



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Recarga inducida en los Llanos Orientales de Colombia

Treball realitzat per:

**Claudia Marcela Peña Martínez**

Dirigit per:

**Jesús Carrera Ramírez**

**Daniel Fernández García**

Màster en:

**Enginyeria del Terreny**

Barcelona, 22 de septiembre de 2017

Departament de Hidrologia Subterrània

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

## **RESUMEN**

Los Llanos Orientales se encuentran ubicados en la región de la Orinoquía colombiana cubriendo cerca de 670.000 km<sup>2</sup>. El clima en la región se define con dos estaciones al año, temporada de lluvias y de sequía, también denominadas localmente invierno y verano. Por su condición de llanura y con los cambios climáticos, se presenta dos problemáticas: la primera durante la temporada invernal, donde gran parte del área permanece inundada; y la segunda, a pesar del potencial hídrico de la zona, durante la temporada de sequía se tiene desabastecimiento de agua y tanto la población como el medio ambiente se ven afectados.

Actualmente, el conocimiento de la hidrogeología de los Llanos Orientales es incipiente y no se tiene evidencia de investigaciones de recarga inducida en la zona. La caracterización hidráulica del acuífero se realizó a partir de estudios ejecutados por entes gubernamentales pero que abarcan áreas muy pequeñas y que están localizadas principalmente hacia el piedemonte de la cordillera cuyos parámetros pueden variar para la planicie.

En esta tesis se han desarrollado 6 escenarios en un área potencialmente inundable de los Llanos Orientales. En estos escenarios se modelan las condiciones naturales para un año de intensas lluvias o húmedo (2010-2011) y un año caracterizado por sequías (2013-2014). A partir de los anteriores se evalúan diferentes propuestas de bombeo, dependiendo de la ubicación de los pozos respecto a las corrientes y del caudal extraído. Su propósito es analizar la viabilidad de la recarga inducida al acuífero, disminuyendo los índices de escorrentía superficial y promoviendo el aprovechamiento del acuífero para abastecimiento de la población, sin afectar negativamente el ecosistema de la región.

Las conclusiones de los diferentes modelos conducen a una aproximación del conocimiento del ciclo hidrogeológico, determinando que los niveles de escorrentía disminuyen muy poco ante la acción del bombeo debido a las propiedades de los suelos limo-arcillosos y al nivel freático muy próximo a la superficie. El bombeo induce la recarga del acuífero al disminuir la exfiltración y los flujos de salida a los ríos. Se determinó que la interacción río-acuífero no se ve afectada si el radio de influencia de los pozos no alcanza las corrientes superficiales.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que de una u otra forma colaboraron en la elaboración de este proyecto:

*A los profesores Jesús Carrera y Daniel Fernández, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica, fundamentales para la realización de este trabajo.*

*A mis compañeros, compañeras y profesores del master de Ingeniería del terreno, por todos los momentos alegres y lecciones aprendidas durante todo este tiempo.*

*A mi familia y a Aldo Chaur por su cariño, comprensión y constante estímulo que me ayudaron a ver la luz en los momentos más difíciles.*

*A Dios por darme el privilegio de formarme profesionalmente y haber conocido en este proceso a tantas personas maravillosas que espero siempre estemos en contacto.*

*A todos ustedes dedico este trabajo. Fue toda una aventura!*

*“El éxito se alcanza convirtiendo cada paso en una meta y cada meta en un paso”*

**C. C. Cortez.**

## TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES.....	- 1 -
1.1	INTRODUCCIÓN .....	- 1 -
1.2	MARCO CONCEPTUAL .....	- 3 -
1.2.1	Hidrogeología de llanuras .....	- 3 -
1.2.2	Recarga de acuíferos .....	- 3 -
1.3	ANTCEDENTES .....	- 6 -
1.4	JUSTIFICACIÓN .....	- 8 -
1.5	OBJETIVOS.....	- 11 -
1.5.1	Objetivo general.....	- 11 -
1.5.2	Objetivos específicos .....	- 11 -
2	MATERIALES Y MÉTODOS .....	- 12 -
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	- 12 -
2.1.1	Geomorfología .....	- 13 -
2.1.2	Geología .....	- 13 -
2.1.3	Hidrogeología.....	- 14 -
2.1.4	Hidrografía .....	- 19 -
2.1.5	Clima.....	- 19 -
2.1.5.1	Precipitación .....	- 20 -
2.1.5.2	Temperatura .....	- 21 -
2.1.6	Suelos y cobertura .....	- 22 -
2.1.7	Actividad económica .....	- 22 -
2.2	MODELOS HIDROLÓGICOS INTEGRADOS .....	- 23 -
2.2.1	Software integrado GSFLOW.....	- 23 -
2.2.2	Región 1 - PMRS .....	- 25 -
2.2.2.1	Intercepción de la capa vegetal.....	- 25 -
2.2.2.2	Evapotranspiración potencial .....	- 26 -
2.2.2.3	Flujo de Horton e infiltración.....	- 26 -
2.2.2.4	El agua en el suelo.....	- 27 -
2.2.2.5	Reservorio capilar .....	- 28 -
2.2.2.6	Reservorio gravitacional.....	- 28 -
2.2.2.7	Reservorio flujo preferencial.....	- 29 -
2.2.3	Región 2 – Corrientes .....	- 29 -
2.2.4	Región 3 – Flujo subsuperficial .....	- 30 -
2.2.4.1	Flujo en zona no saturada.....	- 30 -
2.2.4.2	Flujo subterráneo .....	- 32 -
2.2.4.3	Modelación del bombeo .....	- 32 -
2.2.5	Balance hídrico con GSFLOW .....	- 33 -
2.3	MODELO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	- 34 -
2.3.1	Fuentes de información utilizadas .....	- 35 -
2.3.1.1	Información meteorológica .....	- 35 -
2.3.2	Modelo digital de elevación (DEM) .....	- 37 -
2.3.3	Tipo de suelo .....	- 39 -
2.3.4	Cobertura del suelo.....	- 39 -
2.3.5	Acuífero .....	- 39 -
2.4	DEFINICIÓN DEL MODELO .....	- 40 -

2.4.1	Datos de entrada para PRMS .....	42 -
2.4.2	Datos de entrada para MODFLOW-NWT .....	43 -
2.4.3	Definición de escenarios de modelación .....	44 -
2.4.3.1	Escenario 1. Modelo acoplado de las condiciones naturales de la zona. ....	45 -
2.4.3.2	Escenario 2. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, cerca de las corrientes. ....	45 -
2.4.3.3	Escenario 3. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, lejos de las corrientes. ....	46 -
2.4.3.4	Escenario 4. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, lejos de las corrientes, aumentando el caudal bombeado .....	46 -
2.4.3.5	Escenario 5. Modelo de las condiciones naturales durante un año especialmente seco .....	46 -
2.4.3.6	Escenario 6. Modelo implementando bombeo lejos del río durante un año seco- -	46 -
3	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS MODELADOS .....	47 -
3.1	ESCENARIO 1: MODELO DE LAS CONDICIONES NATURALES DURANTE PERIODO DE LLUVIAS INTENSAS .....	47 -
3.1.1	Comportamiento general.....	47 -
3.1.2	Balance hídrico .....	51 -
3.1.3	Análisis de sensibilidad .....	54 -
3.2	ESCENARIO 2: BOMBEO DISTRIBUIDO EN TODA LA SUPERFICIE .....	56 -
3.2.1	Comportamiento general.....	56 -
3.2.2	Balance hídrico .....	60 -
3.3	ESCENARIO 3: BOMBEO LEJOS DE LAS CORRIENTES PARA EL AÑO HÚMEDO .....	63 -
3.3.1	Comportamiento general.....	63 -
3.3.2	Balance hídrico .....	66 -
3.4	ESCENARIO 4: POZOS LEJOS DE LAS CORRIENTES Y CAUDAL BOMBEADO ALTO. AÑO HÚMEDO .....	67 -
3.4.1	Comportamiento general.....	67 -
3.4.2	Balance hídrico .....	73 -
3.5	ESCENARIO 5: CONDICIÓN NATURAL AÑO SECO .....	76 -
3.6	ESCENARIO 6: BOMBEO LEJOS DE LAS CORRIENTES PARA EL AÑO SECO ..- 80 -	80 -
4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	85 -
4.1	COMPARACIÓN DE BALANCES ENTRE ESCENARIOS 1 AL 4 .....	85 -
4.1.1	Reservorio superficial y capilar.....	85 -
4.1.2	Reservorio gravitacional – zona suelo.....	87 -
4.1.3	Reservorio zona no saturada .....	89 -
4.1.4	Reservorio acuífero.....	90 -
4.1.5	Elección del escenario más apropiado .....	93 -
4.2	COMPARACIÓN DE BALANCES ENTRE ESCENARIOS 1, 5 Y 6 .....	94 -
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98 -
6	REFERENCIAS.....	100 -

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Técnicas de recarga artificial de acuíferos. Fuente: Adaptada de <a href="https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html">https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html</a> .....	4 -
Figura 2. Recarga inducida de acuíferos en zonas de inundación. Fuente: Adaptada de <a href="https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html">https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html</a> .....	5 -
Figura 3. Regiones potencialmente inundables en Colombia. En recuadro rojo se marcan los Llanos Orientales. Fuente: Banco mundial, 2012 .....	8 -
Figura 4. Ecosistema afectado durante las temporadas de sequía. Fuente: Animanaturalis.org .....	9 -
Figura 5. Pérdidas máximas probables en el sector agropecuario para un periodo de 500 años, por departamento. Fuente: Banco mundial, 2012.....	9 -
Figura 6. Tabla de estimación de pérdidas económicas por departamento. Fuente: Banco mundial, 2012. ....	10 -
Figura 7. Localización de los Llanos Orientales (región verde). Fuente: Wikipedia Llanos Orientales.....	12 -
Figura 8. Esquema geomorfológico de la región. Fuente: SGC, 2014 .....	13 -
Figura 9. Geología regional, recuadro rojo corresponde a la zona de estudio. Fuente: SGC, 2014.....	14 -
Figura 10. Zonas hidrogeológicas de Colombia. Fuente: IDEAM, 2014. ....	15 -
Figura 11. Sistema de acuíferos de los Llanos Orientales. Fuente: Modificado de IDEAM, 2014. ....	16 -
Figura 12. Dimensiones y parámetros hidráulicos de los sistemas de acuíferos de los Llanos Orientales. Fuente: IDEAM, 2014.....	16 -
Figura 13. Proyección de acuífero potencialmente explotable, municipio de Maní. Fuente: Veloza, 2009. ....	18 -
Figura 14. Red hidrográfica de la zona de estudio. Fuente: SGC, 2014. ....	19 -
Figura 15. Localización de estaciones meteorológicas. En azul zonas de inundación y en rojo polígono de estudio.....	20 -
Figura 16. Uso del suelo en Colombia. Fuente: Banco mundial, 2012. ....	22 -
Figura 17. Modelo GSFLOW. Fuente: Markstrom et al., 2008. ....	24 -
Figura 18. Discretización de cuenca A) PRMS por medio de HRU B) MODFLOW por malla. Fuente: Markstrom et al., 2008.....	24 -
Figura 19. Interacción PRMS – MODFLOW. Fuente: Markstrom et al., 2008. ....	25 -
Figura 20. Clasificación de reservorios en la zona edáfica. Fuente: Markstrom et al., 2008.-	27 -
Figura 21. Esquema de funcionamiento del paquete SFR. Fuente: Niswonger, R., 2005. .-	29 -
Figura 22. Acoplamiento de flujo vertical a flujo subterráneo en tres dimensiones.....	30 -
Figura 23. Interacción de la recarga y descarga de flujo entre zona edáfica y la zona saturada. Fuente: Niswonger, R., 2006.....	31 -

Figura 24. Esquema de flujo mediante diferencias finitas de una celda a otra. ....	32 -
Figura 25. Balance acoplado entre las diferentes zonas del GSFLOW. ....	33 -
Figura 26. Zona de estudio. ....	35 -
Figura 27. Variación temporal de la temperatura máxima y mínima diarias periodo 2010 - 2014. ....	36 -
Figura 28. Variación temporal de la precipitación diaria. ....	37 -
Figura 29. Modelo digital de elevación utilizado. En rojo se marca la zona de estudio. ....	38 -
Figura 30. Mapa topográfico a partir de DEM. ....	38 -
Figura 31. Definición de corrientes y HRU's. ....	41 -
Figura 32. Modelo de diferencias finitas. ....	41 -
Figura 33. Modelo de MODFLOW-NWT. ....	42 -
Figura 34. Configuración de la red de bombeo para el escenario 2. ....	45 -
Figura 35. Configuración de la red de bombeo para los demás escenarios. ....	46 -
Figura 36. Flujos de la zona superficial para el periodo 2010-2011. ....	47 -
Figura 37. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias, tomando el día 18 de julio, con la topografía de la zona. ....	48 -
Figura 38. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias, tomando el día 1 de febrero, con la topografía de la zona. ....	48 -
Figura 39. Flujos de entrada y salida del acuífero en condiciones naturales para el periodo 2010-2011. ....	49 -
Figura 40. Recarga del acuífero en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	50 -
Figura 41. Exfiltración del acuífero en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	50 -
Figura 42. Interacción acuífero-río en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	51 -
Figura 43. Balance mensual discriminando las zonas verticales que componen el modelo. Fuente: Elaboración propia .....	53
Figura 44. Evolución temporal del almacenamiento en cada una de las zonas del modelo. -	54
Figura 45. Flujo de recarga al acuífero según los valores de almacenamiento. ....	55 -
Figura 46. Exfiltración del acuífero a reservorio gravitacional según los valores de almacenamiento. ....	55 -
Figura 47. Recarga neta según los valores de almacenamiento. ....	55 -
Figura 48. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 2 (a la derecha). ....	56 -
Figura 49. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 2 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia .....	57 -
Figura 50. Flujos en el acuífero para el escenario 2. ....	58 -
Figura 51. Interacción acuífero-río en el escenario 2. ....	58 -
Figura 52. Recarga del acuífero en el escenario 2 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia .....	59 -

Figura 53. Exfiltración del acuífero en el escenario 2 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia .....	59 -
Figura 54. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 2 en cada una de las zonas del modelo. ....	60 -
Figura 55. Balance mensual discriminando las zonas verticales para el escenario 2.....	62 -
Figura 56. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 3 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia .....	63 -
Figura 57. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 3 (a la derecha).....	64 -
Figura 58. Interacción acuífero-río en el escenario 3. ....	64 -
Figura 59. Flujos en el acuífero para el escenario 3. ....	65 -
Figura 60. Recarga del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia .....	65 -
Figura 61. Exfiltración del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia .....	66 -
Figura 62. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 3 en cada una de las zonas del modelo. ....	67 -
Figura 63. Balance mensual discriminando las zonas verticales del escenario 3.....	69 -
Figura 64. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 4 (a la derecha).....	70 -
Figura 65. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 4 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia .....	70 -
Figura 66. Interacción acuífero-río en el escenario 4. Fuente: Elaboración propia.....	71 -
Figura 67. Flujos en el acuífero para el escenario 4. ....	71 -
Figura 68. Recarga del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	72 -
Figura 69. Exfiltración del acuífero en el escenario 4 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	72 -
Figura 70. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 4 en cada una de las zonas del modelo. ....	73 -
Figura 71. Balance mensual discriminando las zonas verticales para el escenario 4.....	75 -
Figura 72. Flujos de la zona superficial para el periodo 2013-2014 (año seco).....	76 -
Figura 73. Flujos en cada reservorio para escenario 5. Año seco.....	78 -
Figura 74. Recarga en el escenario 5 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). ....	79 -
Figura 75. Exfiltración para el escenario 5. Año seco. ....	79 -
Figura 76. Interacción río-acuífero para el escenario 5. Año seco. ....	80 -
Figura 77. Flujos en cada reservorio para escenario 6. Año seco.....	82 -
Figura 78. Recarga para el escenario 6. Año seco. ....	83 -
Figura 79. Exfiltración para el escenario 6. Año seco. ....	83 -
Figura 80. Interacción río-acuífero en el escenario 6. Año seco.....	84 -



Figura 81. Comparación del flujo superficial de Horton y la infiltración para los cuatro escenarios <sup>1</sup> .	- 85 -
Figura 82. Comparación de la variación mensual del almacenamiento capilar para los cuatro escenarios.	- 87 -
Figura 83. Comparación de los flujos de salida del reservorio gravitacional para los cuatro escenarios.	- 87 -
Figura 84. Comparación de la variación mensual del flujo de percolación para los cuatro escenarios.	- 88 -
Figura 85. Comparación de la variación mensual del almacenamiento gravitacional para los cuatro escenarios.	- 88 -
Figura 86. Comparación de los flujos anuales que se presentan en la zona no saturada para los cuatro escenarios.	- 89 -
Figura 87. Comparación de la variación mensual de la recarga para los cuatro escenarios.	- 89 -
Figura 88. Comparación de la variación mensual del almacenamiento de la zona no saturada para los cuatro escenarios.	- 90 -
Figura 89. Comparación de los flujos anuales que se presentan en el acuífero para los cuatro escenarios.	- 91 -
Figura 90. Comparación de la variación mensual de la exfiltración para los cuatro escenarios.	- 91 -
Figura 91. Comparación de la variación mensual de la interacción acuífero-río para los cuatro escenarios.	- 92 -
Figura 92. Comparación del almacenamiento de la zona saturada para los cuatro escenarios.	- 92 -
Figura 93. Comparación de los flujos de salida al río para los cuatro escenarios.	- 93 -
Figura 94. Flujo de salida al río para los escenarios 1, 5 y 6.	- 94 -
Figura 95. Comparación de flujos en los diferentes reservorios para los escenarios 1, 5 y 6.	- 96 -
Figura 96. Comparación de almacenamientos en los diferentes reservorios para los escenarios 1, 5 y 6.	- 97 -

## LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Paisajes de los Llanos Orientales durante la temporada de lluvias. Fuente: Google earth.	- 1 -
Fotografía 2. Obras piloto para la recarga artificial del acuífero de Morroa, Sucre. Fuente: Periódico El Meridiano 03-08-2015	- 7 -
Fotografía 3. Chigüiros en zonas anegadas. Fuente: Google Earth.	- 10 -
Fotografía 4. Vista del caño modelado. Fuente: Google Earth.	- 44 -

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos de estaciones meteorológicas. ....	- 20 -
Tabla 2. Características del ASTER GDEM.....	- 37 -
Tabla 3. Resumen de modelo.....	- 40 -
Tabla 4. Resumen de parámetros ingresados en el PRMS .....	- 43 -
Tabla 5. Datos de entrada para MODFLOW-NWT.....	- 44 -
Tabla 6. Balance mensual para el periodo 2010-1011. Todos los valores están en mm/mes.	52
Tabla 7. Balance mensual del escenario 2 para el periodo 2010-1011 (año húmedo). Todos los valores están en mm/mes. ....	- 61 -
Tabla 8. Balance mensual del escenario 3 para el periodo 2010-1011 (año húmedo). Todos los valores están en mm/mes. ....	- 68 -
Tabla 9. Balance mensual del escenario 4 para el periodo 2010-1011. Todos los valores están en mm/mes. ....	- 74 -
Tabla 10. Balance hídrico para el escenario 5. Año húmedo. ....	- 77 -
Tabla 11. Balance hídrico para el escenario 6. Año húmedo. ....	- 81 -
Tabla 12. Comparación de balances de los escenarios modelados. Las columnas amarillas representan la diferencia del escenario 1 respecto a los escenarios 2,3 y 4. ....	- 86 -
Tabla 13. Comparación de balances de los escenarios 5 y 6. La columna amarilla representa la diferencia del escenario 5 respecto al 6.....	- 95 -

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El balance hidrológico es la herramienta que caracteriza numéricamente el ciclo del agua. El balance es necesario para evaluar la variación de la masa de agua que entra y el que sale del sistema, así como también la que es almacenada a través del tiempo. Su estudio ayuda a planificar el aprovechamiento de recursos hídricos, predecir fenómenos tales como inundaciones o sequías así como también conocer las reservas de agua en el suelo y la interacción de los acuíferos con el medio, es decir, si se tienen procesos de recarga o de pérdida de los volúmenes almacenados.

En Colombia existe un gran potencial de aguas subterráneas. Una de las grandes cuencas determinadas se encuentra en los Llanos Orientales, donde actualmente es explotada para las principales actividades de la región como lo son la ganadería, la agricultura y la extracción de petróleo.

Lamentablemente se tienen muy pocos estudios hidrogeológicos a nivel regional de los Llanos Orientales, por lo que la información base para los parámetros que caracterizan los acuíferos es reducida y en ciertas variables deben realizarse suposiciones tomando como referencia zonas cercanas al piedemonte llanero, que han sido investigadas por las compañías petroleras para sus facilidades.

Esta región se caracteriza adicionalmente por tener altas precipitaciones durante la temporada de lluvias, y dada sus condiciones geomorfológicas de llanura y las propiedades de los suelos limo-arcillosos que la conforman, el drenaje hacia las corrientes superficiales es lento y no permiten infiltrar toda el agua, por lo que gran porcentaje del área permanece anegada durante varios días e incluso meses, sin posibilidad de uso para las actividades económicas de la región (Fotografía 1). La otra problemática se vive durante los meses de sequía, donde a pesar de las grandes reservas hídricas, se presentan graves situaciones de desabastecimiento de agua.



**Fotografía 1. Paisajes de los Llanos Orientales durante la temporada de lluvias. Fuente: Google earth.**

Con la realización del presente trabajo se pretende evaluar el balance hídrico de una zona de los Llanos Orientales que represente las características descritas anteriormente y revisar el concepto de recarga, como cantidad que depende no solo de las propiedades del terreno, sino

también de la gestión hídrica. Para ello, se realiza un acoplado de aguas superficiales y subterráneas, que permita establecer simultáneamente los flujos de entrada y salida de cada una de estos compartimentos. Adicionalmente, con el fin de buscar una posible solución a la problemática de las inundaciones, se modelarán diferentes escenarios con sistemas de bombeo, para conocer si éstos pueden propiciar la recarga de los acuíferos con el agua remanente en superficie y de esta forma reducir los niveles, al mismo tiempo que se proporciona el recurso hídrico demandado por la población.

La tesis reúne en su primer capítulo un marco conceptual referente a la hidrogeología de llanuras y los distintos métodos de recarga artificial de acuíferos, también se analiza la problemática de las zonas anegadas y sus impactos en la población de la región. El capítulo siguiente se concentra en la descripción de la zona de estudio así como en el funcionamiento del software GSFLOW, el cual será implementado para el análisis acoplado, igualmente se detallan cada uno de los parámetros y valores utilizados en cada modelo. Posteriormente vienen los capítulos de presentación de resultados y comparación entre escenarios modelados, a fin de llegar a conocer el comportamiento hidrogeológico de la región y determinar si efectivamente el bombeo puede ser la solución. Por último se muestran las conclusiones de la investigación y propuestas alternativas para futuros trabajos, además de las referencias utilizadas durante ésta. Espero que lo disfruten y que de alguna forma contribuya a enriquecer sus conocimientos, agradezco la retroalimentación de sus comentarios para igualmente incrementar los míos.

## 1.2 MARCO CONCEPTUAL

### 1.2.1 Hidrogeología de llanuras

Como se describe en Kruse y Zimmerman (2002), el conocimiento actual del comportamiento de las aguas subterráneas en grandes llanuras de muy baja pendiente topográfica no es muy profundo. De hecho, con frecuencia, es difícil incluso definir las cuencas hidrográficas superficiales. Las llanuras se caracterizan desde un punto de vista hidrológico por presentar un predominio de los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) sobre los horizontales (escurrentía), por lo que muestran una fuerte interrelación entre el agua superficial y la subterránea.

En zonas de bajo relieve “el agua sobre el terreno no tiene una única dirección de escurrimiento, cabe recordar que el agua escurre en forma desordenada, indefinida e imprevisible, siendo los escurrimientos en este caso areales, mantiformes, etc.”(Fertonani y Prendes, 1983). Esto provoca que durante las inundaciones, el concepto de convergencia del escurrimiento hacia una red de drenaje que es la principal vía de movimiento del agua no sea necesariamente aplicable. La capacidad de drenaje de los cauces es muy pequeña, lo que provoca inundaciones de poca profundidad, generalmente menos de un metro, y tiempo de permanencia muy largo en relación al área de aporte (Scioli, 2011).

Los procesos hidrológicos tienen influencia en la disponibilidad y calidad del agua subterránea, aunque también dependen de las características del medio donde se mueve el agua que están definidas básicamente por las características geológicas.

Los términos de la fórmula del balance hidrológico en una gran llanura tienen importancia diferente respecto a las zonas de alta pendiente. La baja pendiente disminuye la velocidad de escurrimiento superficial regional, y ello implica un mayor tiempo de contacto de agua con la superficie del terreno, incrementándose la posibilidad de infiltración y evapotranspiración. Un aspecto a resaltar es la importancia de los procesos de transporte vertical y almacenamientos que se dan en superficie, en la zona no saturada y la zona saturada.

Para dicho balance deben considerarse los almacenamientos por intercepción en áreas cultivadas, contemplando porcentajes de cobertura areal y factores propios de cada cultivo y sus fases de crecimiento. Los almacenamientos en superficie, temporarios o permanentes, también representan una componente muy importante, por ende, los modelos de simulación deben contemplarlos. El análisis del complejo movimiento del agua en la zona no saturada, la cual conecta los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos, constituye un objetivo primordial y al que se le deba dar un mayor énfasis en las áreas de llanura (Kruse y Zimmerman, 2002).

### 1.2.2 Recarga de acuíferos

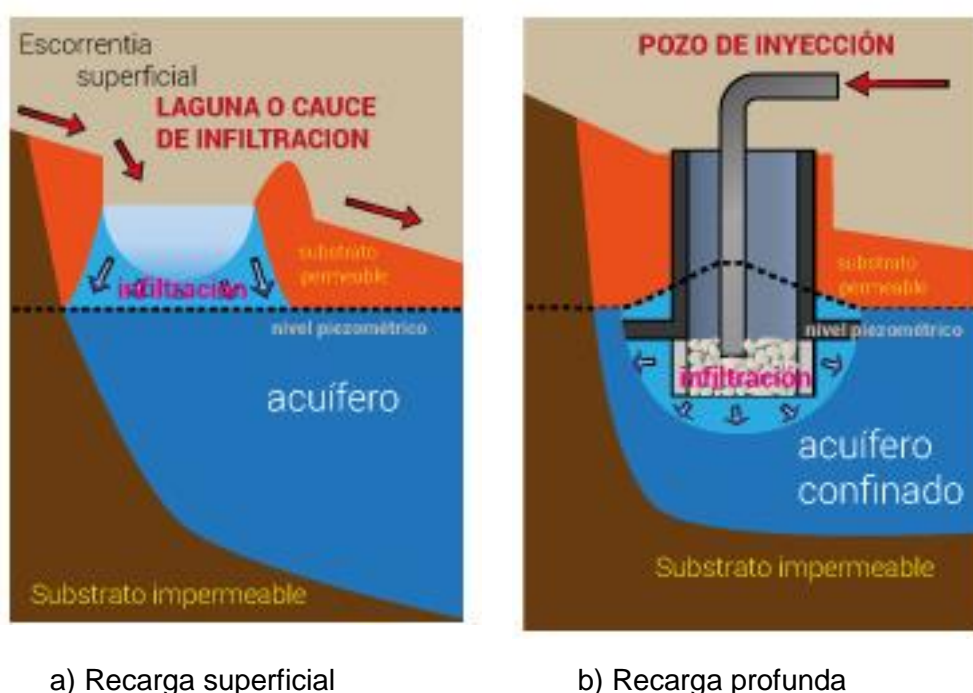
La recarga es el flujo de agua que entra en la zona saturada aumentando el volumen almacenado. Este flujo puede producirse producto de la percolación del agua en superficie así como también del intercambio con fuentes hídricas u otras unidades hidrogeológicas, siendo el caso de la recarga natural propiciada por el ciclo hidrológico. Como ya se ha visto, este proceso depende de las propiedades del suelo y los parámetros capacitivos del acuífero, por lo que puede tomar un largo periodo de tiempo en llegar a producirse, como por ejemplo en acuíferos semiconfinados por una capa de baja permeabilidad (Murillo et al, 2000).

Según Vazquez-Suñé et al (2007), en ríos conectados al acuífero, las inundaciones no representan una gran contribución neta al acuífero porque la mayor parte del agua que entra al acuífero desde el cauce durante la inundación regresa al río cuando desciende el nivel. Para los casos de grandes llanuras, el agua se mantiene en superficie por largos periodos de tiempo

como se mencionó anteriormente, sin embargo existe la posibilidad de acelerar la recarga por medio de sistemas antrópicos.

Una alternativa para acelerar la recarga, es la implementación técnicas que permiten, mediante intervención programada la introducción directa o inducida de agua en el acuífero, incrementando el grado de garantía y disponibilidad de lo recurso hídrico almacenado, así como su calidad.

La recarga artificial se puede practicar en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua, es por esto que debe analizarse previamente las características hidrogeológicas, hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor para garantizar su efectividad, así como al régimen de explotación al que se encuentra sometido. En este sentido debe precisarse que el agua recargada tiene que permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su uso posterior (Murillo et al, 2000).



**Figura 1. Técnicas de recarga artificial de acuíferos. Fuente: Adaptada de <https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html>**

Se han creado diversos métodos en función de que la recarga se efectúe bien por infiltración a través de la superficie del terreno, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo atraviese. El factor determinante para escoger la técnica es la posición del nivel freático o la profundidad del acuífero que se desea recargar, para acuíferos próximos a la superficie se recomiendan lagunas de infiltración o campos de extensión; por el contrario para acuíferos profundos se implementan pozo de inyección tal como se muestra en la Figura 1.

La recarga inducida se puede considerar como un tercer método de recarga artificial o como un caso particular de recarga a través de métodos superficiales. Consiste en provocar la infiltración natural, que tiene lugar desde ríos, lagos o embalses, rebajando el nivel freático mediante pozos de bombeo situados relativamente cerca de dichas masas de agua. Para el caso del presente proyecto, este será el método para determinar la viabilidad de la recarga de acuíferos en las zonas de inundación de los Llanos Orientales colombianos (ver Figura 2).



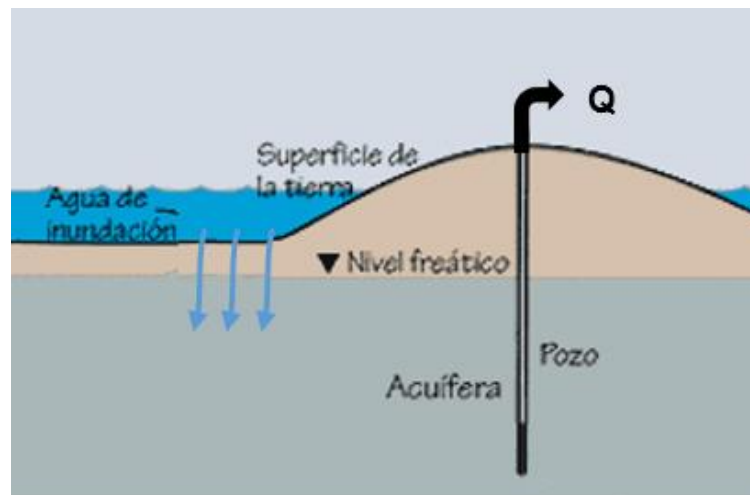


Figura 2. Recarga inducida de acuíferos en zonas de inundación. Fuente: Adaptada de <https://agronomoglobal.blogspot.com.es/2016/12/recarga-de-acuiferos.html>

### 1.3 ANTCEDENTES

En 1983 se realiza en Argentina el Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras, en el cual se sintetizan los avances logrados en este tema, destacándose la interrelación existente entre los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos y la necesidad de intensificar los estudios de acuíferos profundos recargados en las llanuras. En éste se plantea como indispensable avanzar en la cuantificación de los procesos y en la adaptación y desarrollo de modelos de simulación aptos para este tipo de ambientes, que posibiliten la predicción del comportamiento del sistema para situaciones normales o extremas, tanto en su condición natural como afectado por las actividades antrópicas.

A nivel mundial se han realizado estudios en diferentes ambientes para evaluar las opciones de recarga de acuíferos, implementando modelos acoplados que permitan la interacción simultánea de los flujos superficiales con los subterráneos de acuerdo a las condiciones climatológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de cada zona.

Para el caso de llanuras de inundación con características similares a los Llanos Orientales, es casi nula la investigación con la que se cuenta. Sin embargo, se tienen evidencias de modelos realizados en llanuras subtropicales como lo es la pampa argentina, en llanuras aluviales de España o en zonas áridas, los cuales se comentarán a continuación y a partir de éstos se pretende comprender un poco el comportamiento hidrogeológico que se puede llegar a obtener.

En Vasquez-Suñé et al (2007) se estudia el caso de la llanura aluvial del río Llobregat, Barcelona-España, el cual se encuentra desconectado del acuífero. En su estudio presentan una metodología para estimar el rechazo de las inundaciones de los sistemas de aguas pluviales desconectadas. La recarga se estima como el producto de una función de tiempo de inundación (dependiente del caudal) y un factor desconocido, que se obtiene de la calibración de un modelo de flujo de agua subterránea según el nivel de los acuíferos. Esta metodología se aplica a una situación de campo en la que se calcula que, en promedio, la energía de las inundaciones en los ríos asciende a casi 15 millones de  $m^3/año$ , lo que representa el 40% de los insumos totales del acuífero. La recarga de las inundaciones ayuda a explicar las principales recuperaciones de cabeza, por lo que se concluye que dichos eventos son beneficiosos para el acuífero.

La investigación realizada por Álvarez et al (2013) se desarrolla en la Península Valdés, ubicada en el noreste de la Patagonia, se caracteriza por un clima árido y carece de cursos de agua permanente. La metodología utilizada consistió en la resolución del balance hídrico de paso diario, la estimación a través de la fluctuación de niveles y el balance del ion cloruro. Los resultados obtenidos indican que el porcentaje de agua de lluvia que alcanza al acuífero es del orden del 10 % según la metodología del balance, entre 9 % y 16 % en relación a la fluctuación de niveles, y del 4,5 % en base al método de los cloruros. Teniendo en cuenta las limitaciones de cada uno de ellos se concluye que el agua de recarga representa el 10 % de la precipitación local.

En el modelo hidrodinámico desarrollado para la llanura tributaria del río de la Plata, Buenos Aires-Argentina (González et al, 2003), se tienen dentro del sistema geohidrológico los subsistemas Activo (Zona No-Saturada y acuíferos freático) y Profundo (acuíferos Paraná y Olivos) sobre un basamento acuífugo, analizándose las interrelaciones dentro del primero. En este escenario se tiene bombeo en el acuífero. La recarga ocurre por la ZNS y conjunto freático-Pampeano hacia el semiconfinado en los sectores medio-superior, invirtiéndose el sentido del flujo vertical en la planicie del río de la Plata. La circulación horizontal incluye la descarga como caudal básico del subsistema activo y el flujo regional hacia el río de la Plata. Considerando el sector medio-superior, los resultados del modelo indican sobre 34.7  $hm^3$  de excesos, salidas de 1.82  $hm^3$  por efluencia superficial, 7.0  $hm^3$  por filtración vertical (de los cuales 1.31  $hm^3$  egresan por el acuífero semiconfinado), 0.63  $hm^3$  por efluencia freática y 5.4  $hm^3$  son extraídos por bombeo, con una variación de almacenaje de 18.54  $hm^3$ .



De los modelos presentados se puede concluir que la recarga en este tipo de ambientes geomorfológicos puede representar un porcentaje muy bajo de la precipitación registrada en la región, sin embargo existe la posibilidad que los efectos de las inundaciones propicien la infiltración al permanecer más tiempo el agua en contacto con el suelo. De igual forma debe tenerse en cuenta que pueden presentarse flujos de rechazo de la recarga si el nivel freático se encuentra próximo a la superficie.

En Colombia no se encuentran registros de estudios que evalúen la recarga inducida de acuíferos en los Llanos Orientales, no obstante, se han desarrollado investigaciones de modelación acoplada para la gestión de recursos hídricos y planes piloto para la recarga inducida en otras regiones del país.

Estrada et al (2010), presenta una metodología de modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas a partir de la integración de un modelo de flujo subterráneo (MODFLOW) con un modelo hidrológico que permite estimar la producción de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos. Los resultados obtenidos en la modelación muestran como para un acuífero que tiene unas características geométricas e hidrogeológicas determinadas, la disminución en los caudales superficiales debida a la extracción de aguas subterráneas tiene una alta dependencia con la distancia del pozo respecto al río y con el caudal explotado.

Se tiene referencia de dos experiencias en recarga artificial en Colombia, una en el río Manzanares en Santa Marta y otra experiencia que aún está en fase piloto en el acuífero de Morroa, Sucre. Las obras de recarga artificial diseñadas y construidas para el acuífero de Morroa se realizan para asegurar la explotación sostenible del acuíferos, dado que según estudios isotópicos no hay recarga natural apreciable (MinAmbiente, 2014). Las obras constan de un pozo de inyección y una represa para almacenar agua lluvia, ya que las precipitaciones en esta región son bajas y no proporcionan la recarga suficiente (Fotografía 2).



**Fotografía 2. Obras piloto para la recarga artificial del acuífero de Morroa, Sucre. Fuente: Periódico El Meridiano 03-08-2015**

Como se puede apreciar el desarrollo de este trabajo brindará un conocimiento fundamentado sobre el ciclo hidrogeológico de los Llanos Orientales, donde se podrá analizar la interacción acoplada de la precipitación, los flujos superficiales y la recarga que se genera al acuífero, así como también los impactos que se pueden presentar por la intervención antrópica.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

En Colombia, la presencia de llanuras bajas y valles aluviales, asociada a altas precipitaciones facilitan la ocurrencia de inundaciones, algunas de manera lenta, que afectan grandes extensiones de terreno, y otras más rápidas asociadas a lluvias intensas en la parte alta de las cuencas con fuertes pendientes. La amenaza por inundación se entiende como la probabilidad de ocurrencia de desbordamientos de ríos como resultado de lluvias fuertes o continuas que aumentan el nivel de las aguas, a tal punto que el río se sale del cauce natural en un período determinado que puede causar impactos negativos en una población, en el sector agropecuario y la infraestructura (Banco mundial, 2012).



**Figura 3. Regiones potencialmente inundables en Colombia. En recuadro rojo se marcan los Llanos Orientales. Fuente: Banco mundial, 2012**

El 12% del territorio nacional se encuentra localizado en áreas con una mayor susceptibilidad a inundarse. Estas áreas se concentran principalmente en el oriente del país, en las llanuras bajas de la cuenca del río Orinoco (ver Figura 3). Los Llanos Orientales es una de las regiones con mayor potencial de inundación, donde se concentran las poblaciones con mayores índices de pobreza, déficits cualitativos de vivienda, menores coberturas de acueducto y alcantarillado, mayores rezagos y mayores índices de ruralidad (PNUD, 2011). Otra problemática se presenta durante las temporadas de sequía, que a pesar de ser una región con gran potencial hídrico, sufre desabastecimiento de agua afectando al ecosistema de la región (Figura 4).



Figura 4. Ecosistema afectado durante las temporadas de sequía. Fuente: Animanaturalis.org

La zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento del Casanare cuya principal actividades económica es la agricultura y ganadería. Debido a su gran extensión es el departamento con mayores pérdidas económicas según el Análisis de Riesgo efectuado por el Banco Mundial, alcanzando más de un 80% como se observa en la Figura 5.

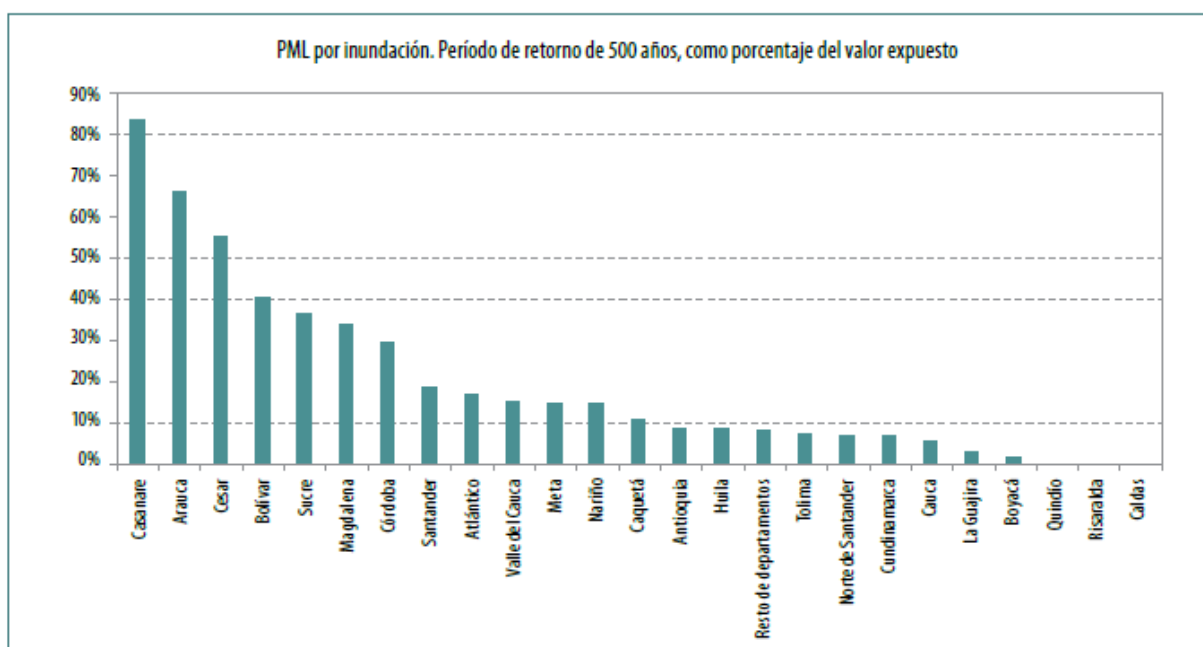


Figura 5. Pérdidas máximas probables en el sector agropecuario para un periodo de 500 años, por departamento. Fuente: Banco mundial, 2012.

En términos monetarios evidenciados en la Figura 6, el Casanare presenta las mayores cifras, demostrando pérdidas económicas (estimadas en millones de dólares) de 216, 389 y 864 para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente. Dichos valores son impactantes comparando con los demás departamentos susceptibles a las inundaciones, los cuales ningún otro supera los 400 millones de dólares para el periodo extremo de los 500 años.



Departamento	Expuesto (US\$ millones)	PML (%)			PML valor (US\$ millones)		
		Períodos de retorno			Períodos de retorno		
		50	100	500	50	100	500
Antioquia	1.295	2,28	4,10	9,12	30	53	118
Atlántico	84	4,28	7,71	17,14	4	7	14
Arauca	448	16,47	29,65	65,89	74	133	295
Bolívar	510	10,07	18,12	40,27	52	93	208
Boyacá	564	0,47	0,84	1,87	3	5	11
Caldas	294	0,0	0,01	0,01	0	0	0
Caquetá	1.091	2,74	4,94	10,97	30	54	120
Cauca	545	1,49	2,68	5,96	8	15	33
Cesar	641	13,86	24,95	55,45	89	160	356
Córdoba	607	7,42	13,36	29,69	45	81	180
Cundinamarca	677	1,74	3,13	6,96	12	21	47
Huila	521	2,20	3,95	8,79	11	21	46
La Guajira	529	0,68	1,22	2,71	4	6	14
Magdalena	571	8,50	15,30	33,99	49	87	194
Meta	1.484	3,74	6,73	14,97	56	100	222
Nariño	364	3,73	6,71	14,92	14	24	54
Norte de Santander	413	1,76	3,16	7,02	7	13	29
Quindío	104	0,01	0,02	0,05	0	0	0
Risaralda	147	0,01	0,01	0,02	0	0	0
Santander	733	4,69	8,45	18,77	34	62	138
Sucre	282	9,17	16,50	36,67	26	47	103
Tolima	749	1,85	3,32	7,39	14	25	55
Valle del Cauca	612	3,91	7,04	15,64	24	43	96
Casanare	1.038	20,81	37,45	83,22	216	389	864
Resto de departamentos	2.710	2,10	3,78	8,41	57	103	228

Figura 6. Tabla de estimación de pérdidas económicas por departamento. Fuente: Banco mundial, 2012.

La propuesta del presente trabajo, no sólo busca reducir las áreas afectadas por inundaciones, sino también propiciar el abastecimiento de agua por medio de bombeo de los acuíferos (induciendo la recarga de los mismos) para satisfacer la demanda de este recurso tanto para la población civil como para las necesidades del sector industrial y agropecuario, buscando siempre un equilibrio sustentable con el ecosistema de la región (Fotografía 3).



Fotografía 3. Chigüiros en zonas anegadas. Fuente: Google Earth.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo general**

Realizar la investigación sobre la recarga inducida de acuíferos en zonas de inundación de los Llanos Orientales colombianos, implementando un sistema de bombeo.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar la zona de estudio en los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y climáticos.
- Establecer la interacción del flujo superficial y subterráneo mediante la implementación de software de modelación acoplada.
- Simular diferentes escenarios (con bombeo y sin bombeo) para determinar el balance hídrico del sistema.
- Realizar la comparación entre escenarios modelados para determinar la eficiencia del bombeo y sus efectos en los flujos del balance hidrológico.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los Llanos Orientales se encuentran ubicados en la región de la Orinoquía colombiana cubriendo cerca de 670.000 km<sup>2</sup>. Se extienden desde el piedemonte de la cordillera oriental hasta la frontera con Venezuela (ver Figura 7). Se caracteriza por zonas llanas o sabanas empedradas con altitudes entre 100 y 500 m.s.n.m. y conforma la gran cuenca hidrográfica del río Orinoco, donde se destacan los ríos Arauca, Guaviare y Meta.

El clima en la región se define con dos estaciones al año, temporada de lluvias y de sequía, también denominadas localmente invierno y verano. La estación seca comprende desde noviembre hasta mitad de marzo durante los cuales los fenómenos de precipitación son escasos; por el contrario la estación húmeda, cubre los meses de abril a octubre, se caracteriza por lluvias torrenciales las cuales en ocasiones se prolongan por varios días. La temperatura permanece relativamente constante durante todo el año, donde las máximas alcanzan valores de 35° y las mínimas alrededor de los 20° centígrados.

Estos cambios climáticos no sólo influyen en la vegetación, produciendo un paisaje verde en invierno y amarillo grisáceo en verano, sino que afectan los suelos en su composición y aptitud de uso, marcan la iniciación de ciclos de importancia para las especies animales y vegetales y por consiguiente alteran las actividades humanas.



**Figura 7. Localización de los Llanos Orientales (región verde). Fuente: Wikipedia Llanos Orientales.**

La mayor parte de los centros urbanos se concentran en el piedemonte de la cordillera oriental, la amplia llanura se dedica principalmente en la ganadería extensiva y en la extracción de petróleo. En los llanos de Arauca se encuentra Caño Limón, uno de los principales yacimientos petrolíferos de Colombia. En el departamento del Meta recientemente se han encontrado diversos pozos petrolíferos, y en el pie del monte de Casanare se encuentran los campos de Cusiana. Existen varios proyectos agrícolas, así como algunos proyectos energéticos basados en la energía eólica, pero la ganadería domina la mayor parte de la actividad llanera.

En el presente capítulo se describe en detalle los componentes geológicos, climatológicos e hidrogeológicos de los Llanos Orientales.

### 2.1.1 Geomorfología

La cuenca de los Llanos Orientales, a través del tiempo, ha estado sometida a procesos de levantamiento, hundimiento y erosión durante diferentes épocas, dando origen a las geoformas actuales en la zona. Como se observa en la Figura 8, se identifican tres unidades principales en la zona de estudio: Una llanura aluvial de desborde a lo largo de la margen occidental del río Meta, producto de la acumulación de los sedimentos finos, arcillas, limos y arenas, depositados en la zona más distal de los abanicos aluviales generados en el piedemonte de la Cordillera Oriental; una altillanura (penillanura) presente en la margen oriental del río Meta y que se extiende hasta el río Orinoco, conformada por sedimentos finos acumulados sobre un bloque tectónicamente estable, separado por la Falla del Meta y donde predominan procesos erosivos, y la unidad de aluviones recientes principalmente a lo largo del ríos Meta (SGC, 2014).

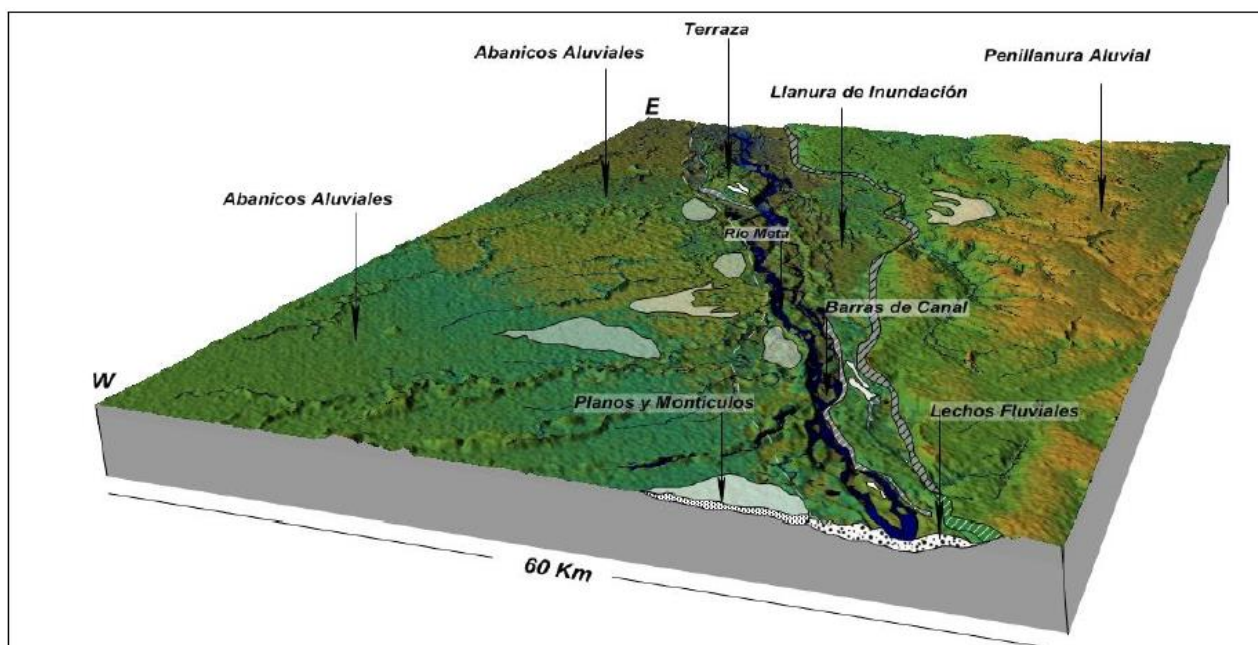


Figura 8. Esquema geomorfológico de la región. Fuente: SGC, 2014

### 2.1.2 Geología

Regionalmente el área de estudio se encuentra en la cuenca sedimentaria Llanos, la cual se desarrolló principalmente durante el Cretáceo y estaba limitada por el escudo de la Guayana al Occidente y la Cordillera Central emergida al Oriente. Debido al posterior levantamiento de



la Cordillera Oriental se inició una alta sedimentación de esta nueva Cordillera hacia la cuenca sedimentaria actual.

Los procesos geológicos posteriores han contribuido a la generación de unidades Cuaternarias de origen fluvial, que regionalmente se localizan en el sector conocido como Piedemonte Llanero y que incluyen depósitos coluviales y terrazas aluviales recientes; otros depósitos generados en el cauce actual y planicie de inundación de cauces principales como los ríos Guayuriba, Guamal, Acacías y Orotó corresponden a la unidad de Cuaternarios aluviales y están conformados por arenas, limos y gravas; la distribución de estas unidades puede apreciar en la Figura 9.

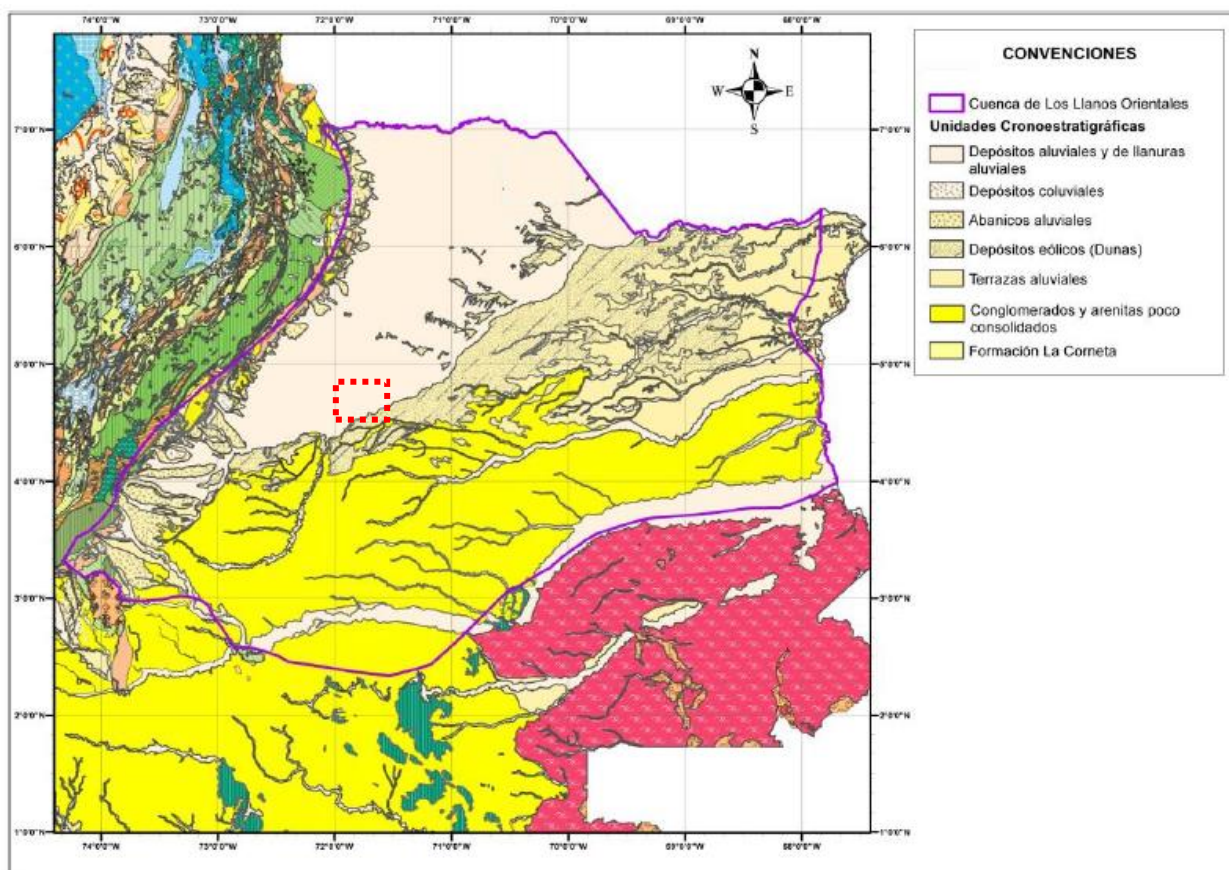


Figura 9. Geología regional, recuadro rojo corresponde a la zona de estudio. Fuente: SGC, 2014

En el recuadro rojo de la Figura 9 se muestra la zona de estudio, en la cual predomina la unidad de depósitos aluviales y de llanuras aluviales de inundación. Las llanuras de inundación están constituidas por arenas finas a muy finas, limos y arcillas, mientras en las barras de cauce predominan arenas finas a medias. Los granos son subredondeados a redondeados, subesféricos, y bien seleccionados, de cuarzo monocristalino y, en menor proporción, de líticos oxidados. La coloración varía entre gris marrón y naranja amarillento (SGC, 2014).

### 2.1.3 Hidrogeología

En términos generales, en Colombia se identificaron 16 cuencas hidrogeológicas que alojan sistemas acuíferos multicasas con condiciones favorables para su explotación (ver Figura 10).





**Figura 10. Zonas hidrogeológicas de Colombia. Fuente: IDEAM, 2014.**

La Cuenca de los Llanos Orientales se ubica en la amplia planicie oriental del territorio colombiano en jurisdicción de los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y parte del Vichada. Se extiende desde la falla de Guaicaramo en las estribaciones de la Cordillera Oriental hacia el oriente y comprende una gruesa secuencia de rocas sedimentarias que conforman una estructura monoclinal basculada que se adelgaza hacia el Este. Depósitos cuaternarios fluvio-lacustres suprayacen esta secuencia la cual a su vez descansa sobre la paleotopografía del basamento ígneo-cristalino del escudo precámbrico de la Guyana que se levanta hacia el oriente. En esta estructura geológica se desarrollan acuíferos libres a semiconfinados, poco explotados, en los sedimentos aluviales y de terraza y confinados en las rocas sedimentarias arenosas y conglomeráticas que presentan porosidad intergranular (Ingeominas, 1987).

En las áreas hidrográficas del Orinoco, el estado del conocimiento hidrogeológico es bajo, a pesar de que los Sistemas Acuíferos son estratégicos para el abastecimiento de centros urbanos como Villavicencio y poblaciones de menor tamaño como Maní (Casanare). Como se observa en la Figura 11, se han identificado 3 sistemas de acuíferos en los Llanos Orientales nombrados como: SAP 3.1 ubicado en el departamento del Meta, SAP 3.2 situado en el departamento de Casanare y SAP 3.3 localizado en Arauca. Sin embargo, aquel con mayor cantidad de estudios corresponde al SAP3.1.

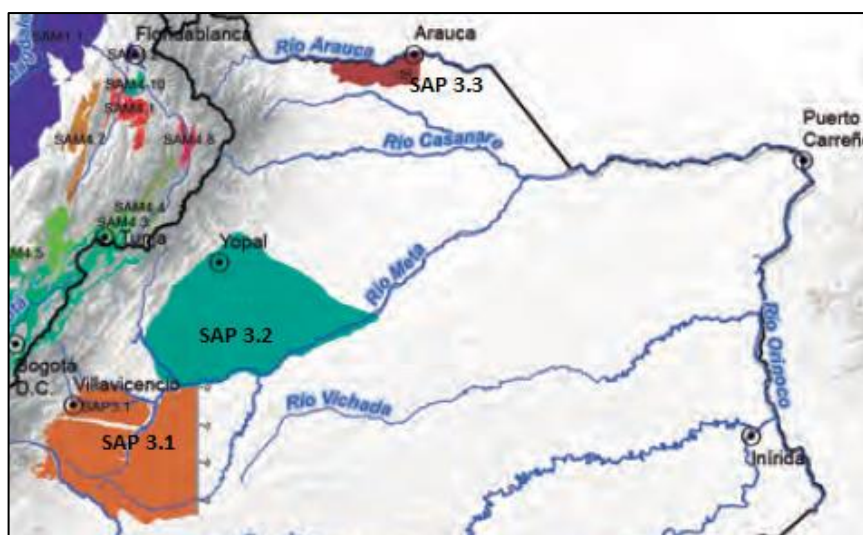


Figura 11. Sistema de acuíferos de los Llanos Orientales. Fuente: Modificado de IDEAM, 2014.

Principalmente la información hidrogeológica está referida al acuífero Cuaternario, pero se carece de un modelo hidrogeológico conceptual regional. El SAP3.2 (Yopal- Tauramena) ha sido estudiado parcialmente en la población de Maní (Casanare), donde el agua subterránea constituye la fuente de abastecimiento de la población dada la falta de infraestructura de servicios públicos de acueducto y alcantarillado (IDEAM, 2014).

En la Figura 12, se consolidan los parámetros hidráulicos de los sistemas descritos anteriormente. Los acuíferos de la región se catalogan como libres, debido a la cercanía del nivel freático a la superficie, y confinados, por las capas de material limo arcilloso de las llanuras aluviales que forman una barrera semi-impermeable. Para el SAP 3.1, se tienen espesores mayores a 230m, con transmisividades bajas que oscilan entre 100 a 220m<sup>2</sup>/día y coeficientes de almacenamiento de hasta  $1.5 \times 10^{-3}$ , característicos de acuíferos semi-confinados. El sistema SAP 3.2, lastimosamente no tiene parámetros hidráulicos determinados debido a la carencia de estudios, sin embargo debido a la cercanía con el sistema SAP 3.1 y que hacen parte de la misma red hidrográfica del río Meta y su llanura de inundación, pueden tomarse valores similares.

A diferencia de los sistemas del Meta y Casanare, el sistema SAP 3.3 tiene espesores a gran profundidad alcanzando los 900m y presenta transmisividades relativamente altas (650 a 750m<sup>2</sup>/) que favorecen su explotación. Sin embargo, su área superficial es mucho menor.

Provincia hidrogeológica	Código	Sistema acuífero	Unidades hidrogeológicas	Tipo de acuíferos	Parámetros hidráulicos		Área superficial (Km²)
Área hidrográfica del Orinoco							
PP3 Llanos orientales	SAP3.1 (13S)	Villavicencio-Granada-Puerto López	Acuífero Cuaternario y Acuífero Terciario	Libres a confinados	B= 80 a >230 m	T= 102 a 215 m²/d S= 9.9x10-4 a 1.5x10-3	13.753
	SAP3.2 (13S)	Yopal Tauramena (Maní)	Acuífero Terrazas de planicie aluvial (Qt), Acuífero de depósitos aluviales recientes (Qal)	Libres a confinados			17.446
	SAP3.3 (13S)	Arauca - Arauquita	C-D1-D2, F	Libres a confinados	B= 280 a 900 m K= 22.6 m/d	T= 650 a 750 m²/d S= 0.3 a 3.2x10-4	1.807

Figura 12. Dimensiones y parámetros hidráulicos de los sistemas de acuíferos de los Llanos Orientales. Fuente: IDEAM, 2014.

En el Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico realizado en el Municipio de Maní, Casanare, por la Universidad Industrial de Santander, se ejecutaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) para prospección de acuíferos. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 13, se observan arenas saturadas desde 30m que aumentan su volumen de extensión, conforme se profundiza, hasta alcanzar alrededor de los 200m, considerando así el acuífero potencialmente explotable. Sin embargo, hacen falta pruebas de bombeo para poder cuantificar la capacidad del acuífero y sus propiedades hidráulicas.

Otra de las conclusiones del estudio referido presenta la existencia de dos tipos principales de flujos de agua subterránea; un flujo regional proveniente de infiltración y recarga en las zonas de afloramiento de las formaciones del Pie de monte Llanero, donde el agua se percola y se mueve hacia el SE a sectores de menor pendiente topográfica. Y otro flujo de agua originado de la recarga por infiltración directa en los materiales de alta permeabilidad y los esteros con una dirección preferencial hacia el SE. (Veloza, 2009). Para la zona del presente estudio, se tendrá principalmente el último flujo descrito ya que se encuentra alejada del piedemonte de la cordillera.

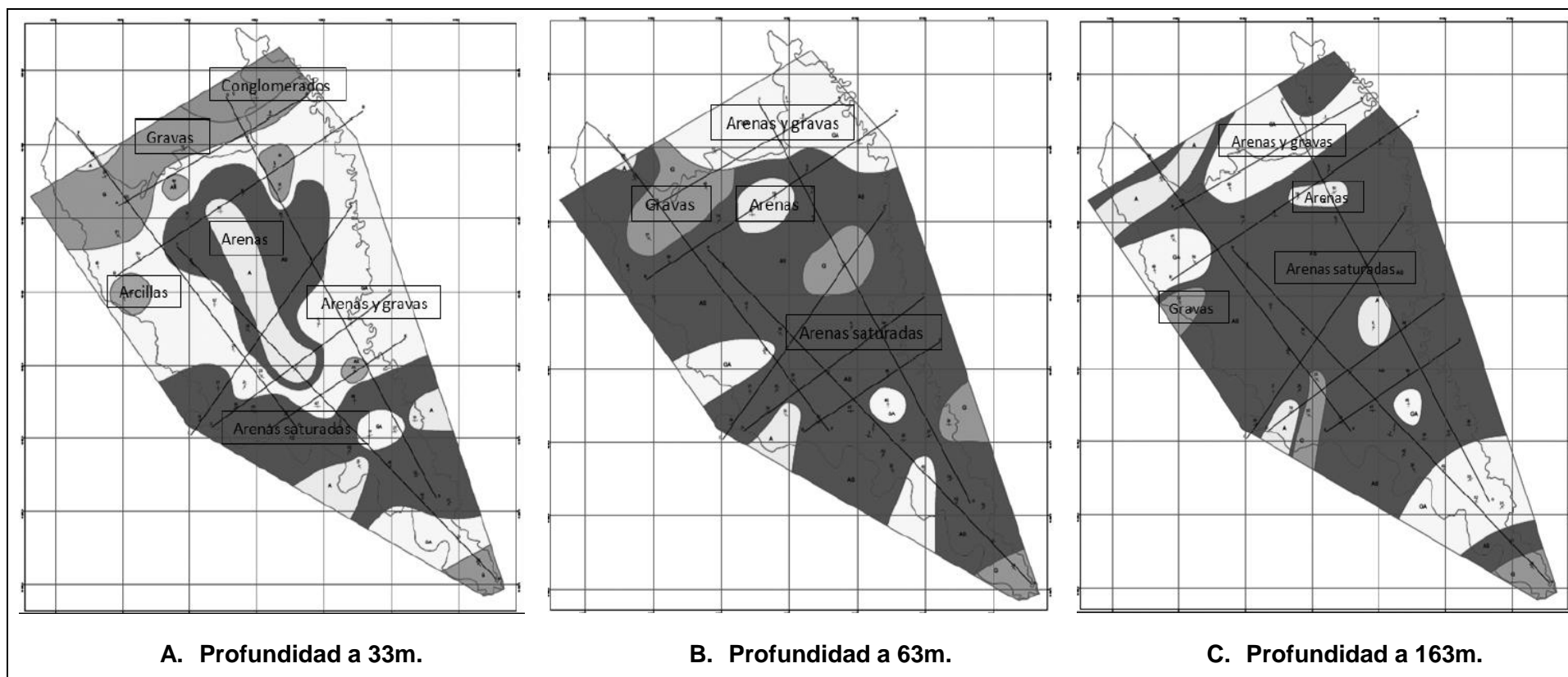
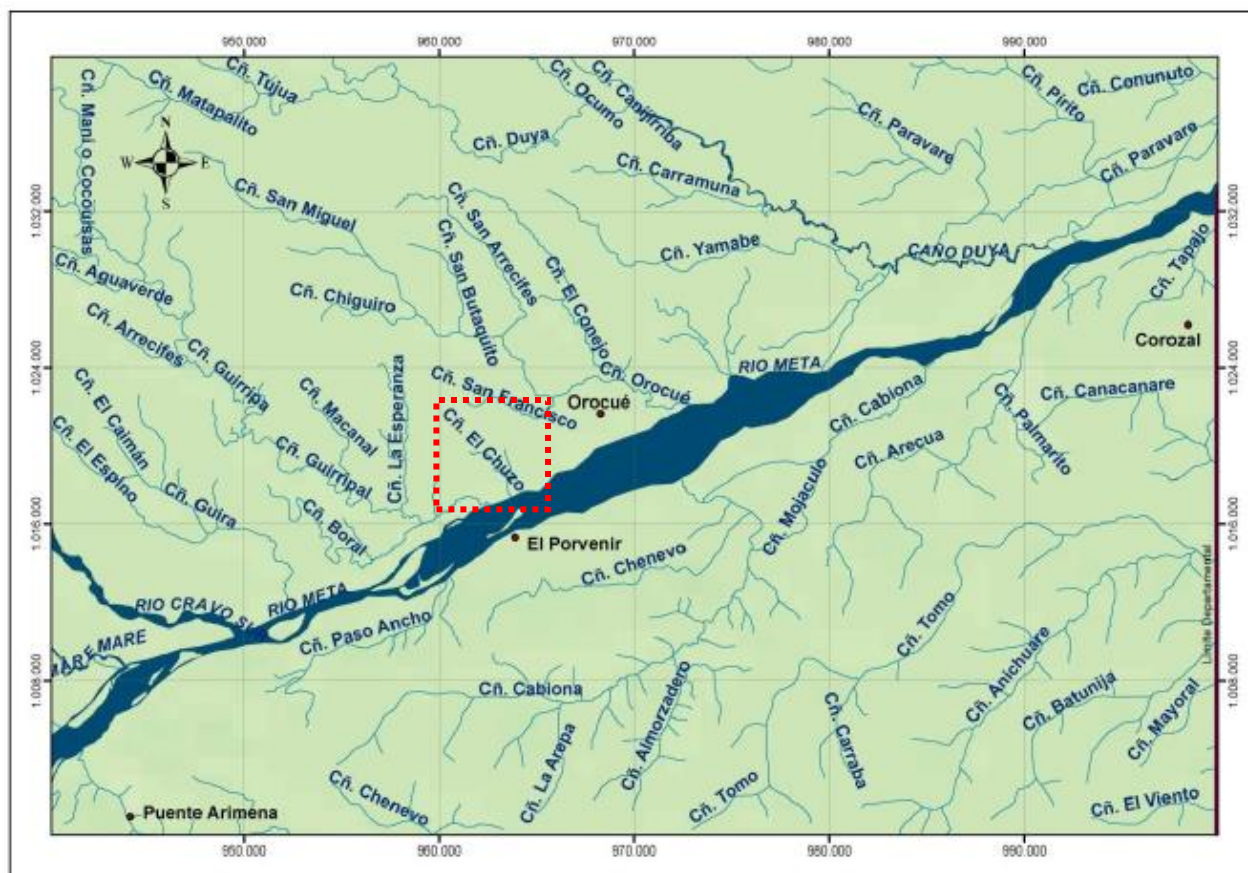


Figura 13. Proyección de acuífero potencialmente explotable, municipio de Maní. Fuente: Veloza, 2009.



#### 2.1.4 Hidrografía

La red hidrográfica hace parte de la cuenca del río Orinoco y tiene como principal drenaje el río Meta. Como se observa en la Figura 14, el río cruza el área en dirección suroeste a noreste, entre los principales afluentes están: el río Cravo Sur y los caños Maremare, Guira, Guirripa, Arimena, Paso Ancho, Cabiona y Duya. Hacia la parte sureste se localiza el nacimiento del río Tomo, y caños menores como: Carraba, Anichuare, Batunija, Mayoral y El Chuza sobre el cual está localizada la zona de estudio (SGC. 2014).



**Figura 14. Red hidrográfica de la zona de estudio. Fuente: SGC, 2014.**

Aunque podría creerse que es una amplia red de drenaje, lo cierto es que los afluentes principales quedan distanciados más de 10Km entre sí y los caños presentan secciones hidráulicas reducidas. Adicionalmente, los desniveles topográficos son muy bajos y no permiten el drenaje continuo hacia dichas corrientes, formando zonas anegadas.

### 2.1.5 Clima

Los elementos climáticos de interés para el presente estudio son la precipitación y temperatura, mediante los cuales es posible definir el fenómeno de evapotranspiración. Los factores como pendiente, altitud y formas del relieve son importantes ya que generan cambios climáticos a nivel regional o local, mientras que la cobertura vegetal es causa y efecto del clima.

Los Llanos Orientales están ubicados en la zona tropical, que se caracteriza por tener la mayor cantidad de horas en las que incide el sol, por lo que se presentan algunos fenómenos subsecuentes como la evaporación. En consecuencia, esta zona también se caracteriza por ser una de las zonas más lluviosas del planeta tierra.

Para el presente estudio, se tomaron como referencia las estaciones meteorológicas del IDEAM más próximas al área y que estuvieran en funcionamiento hasta la fecha, éstas son la estación de Puerto Texas y la estación Carimagua, ambas con registros de precipitación diaria y temperatura máxima, mínima y promedio (ver Figura 15). La información de dichas estaciones se encuentra en la Tabla 1.



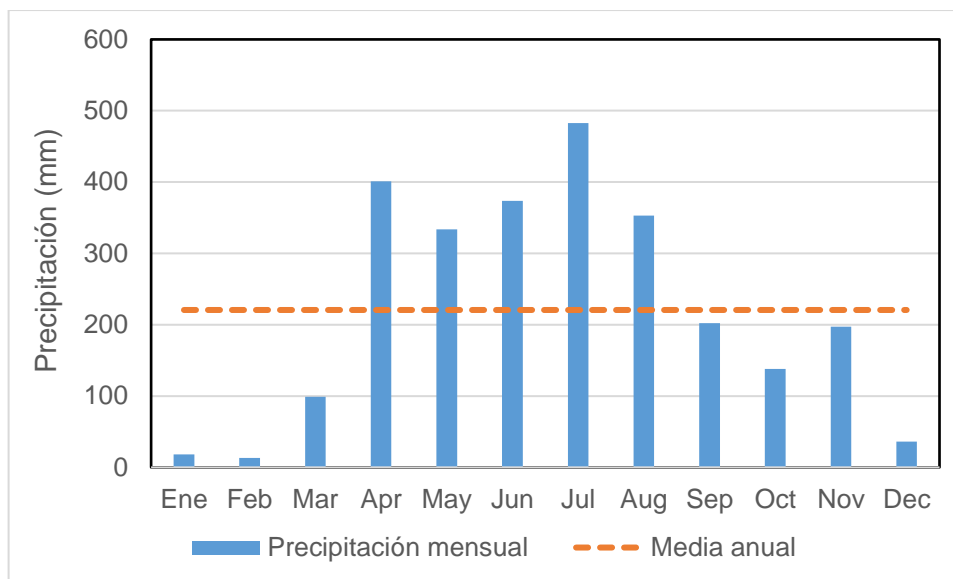
**Figura 15. Localización de estaciones meteorológicas. En azul zonas de inundación y en rojo polígono de estudio.**

**Tabla 1. Datos de estaciones meteorológicas.**

Estación Carimagua	Longitud oeste	°	71.2
	Latitud norte	°	4.35
	Elevación	m.s.n.m.	200
	Código IDEAM	-	33035010
Estación Puerto Texas	Longitud oeste	°	71.57
	Latitud norte	°	4.25
	Elevación	m.s.n.m.	142
	Código IDEAM	-	35180050

#### 2.1.5.1 Precipitación

El área en estudio; por su ubicación en la zona tropical, está en la Zona de Confluencia Intertropical o ZCIT, donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte y sur. En promedio entre diciembre a marzo se presenta el período de bajas precipitaciones denominado verano, debido a que los vientos alisios del noreste son los dominantes en esta época del año y desplazan hacia el sur la ZCIT. El período denominado de invierno donde se registran precipitaciones altas, se extiende de abril a noviembre debido a que en esta época los vientos alisios del sureste empiezan a ser los dominantes, desplazando la ZCIT hacia el norte. El prolongado período de lluvias se debe al doble paso de la ZCIT por la alternancia de los vientos alisios dominantes.

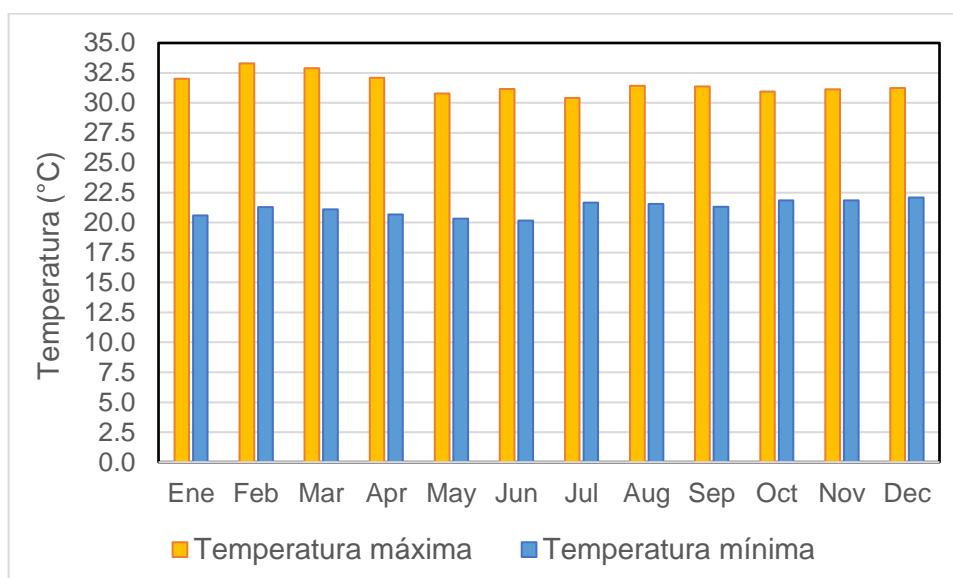


**Gráfico 1. Distribución temporal de la precipitación.**

En promedio para el área de estudio, la precipitación media mensual varía en el invierno entre 138 mm para octubre y 482.8 mm para julio, considerado como el mes más lluvioso. En este periodo de invierno en promedio se recibe el 93% de las lluvias totales del año, que representan un total de 2648mm. Por su parte, la precipitación media mensual en el verano, varía en promedio desde 13 mm para febrero, considerado como el mes menos lluvioso, y 99 mm para el mes de marzo. En este periodo de verano se recibe en promedio el 7 % de las lluvias restantes del año, correspondiente a 166mm.

#### 2.1.5.2 Temperatura

En general, para la zona en estudio la temperatura media mensual se encuentra en torno a 26.5°C, de acuerdo con los registros de las estaciones analizadas. Por su parte, las temperaturas máximas se mantienen en promedio en 31.5°C y las mínimas en 21°C. Estas temperaturas corresponden a un clima cálido, como se observa en el Gráfico 2.



**Gráfico 2. Distribución temporal de la temperatura máxima y mínima mensual.**

### 2.1.6 Suelos y cobertura

La mayoría de los suelos en esta parte de los Llanos Orientales se derivan de sedimentos limo – arcillosos recientes de origen aluvial, caracterizados por el alto contenido de hierro y aluminio, así como la pérdida de minerales básicos por lixiviación debido al exceso de humedad durante la época de lluvias. En consecuencia, los suelos presentan un alto grado de acidez, limitando su capacidad para el desarrollo de cultivos comerciales tradicionales (SGC, 2014).

La zona de estudio al estar ubicada en la planicie de inundación, se compone de Suelos mal a pobremente drenados, superficiales a profundos, de textura arcillosa, saturados con agua durante algún período del año, poco permeables; de fertilidad media; y son susceptibles a encharcamientos e inundaciones. Esta unidad mayor cubre la margen noroeste del río Meta y está asociada con el cauce y sedimentos recientes de dicho afluente.

Como se observa en Figura 16, la región de los Llanos Orientales está cubierta por pastos y algunos cultivos y bosques en las márgenes de los ríos, sin embargo es importante recalcar la amplia zona de inundación que cubre temporalmente el área.



**Figura 16. Uso del suelo en Colombia. Fuente: Banco mundial, 2012.**

### 2.1.7 Actividad económica

La economía tiene como principales actividades la ganadería, la agricultura, la pesca, el comercio, y la exploración petrolera. Los cultivos más representativos son el maíz, la yuca, el plátano y los cítricos.

Otro segmento de la economía que en la actualidad se encuentra en expansión, son las actividades de exploración de hidrocarburos, las cuales vienen constituyéndose en un



segmento de producción de ingresos importante para los habitantes de la zona, debido a la generación de empleo para la población local y la inversión directa que realizan las empresas.

Estas últimas han incrementado la demanda de agua para llevar a cabo los procesos relacionados con la producción de hidrocarburos y han considerado la importancia del aprovechamiento de los acuíferos presentes en la zona.

## 2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS INTEGRADOS

La base fundamental del presente estudio en los Llanos Orientales colombianos, es determinar el comportamiento del régimen de precipitaciones, la interacción de flujos superficiales y subterráneos así como también la evapotranspiración, es decir conocer su ciclo hidrológico y posteriormente analizar su afectación ante una posible fase de bombeo.

Existen software especializados en modelar de forma independiente el flujo superficial del subterráneo, donde la descarga producida en el suelo corresponde a la recarga del acuífero, representada como una condición de contorno. Sin embargo, con la aparición de los Modelos Hidrológicos Integrados (IHM, por sus siglas en inglés *Integrated Hydrologic Models*), es posible realizar el balance hídrico de forma simultánea, considerando la evapotranspiración, escorrentía, recarga y descarga en cada una de las fases, de acuerdo a la precipitación, temperatura y demás condiciones fronterizas.

La importancia de dichos modelos radica en que el proceso se realiza de forma continua, proporcionando un comportamiento más preciso del ciclo hidrológico en el cual se pueden incluir todo tipo de condiciones internas y externas, de esta forma es posible determinar el mejor aprovechamiento de recursos hídricos así como también sus deficiencias.

Los IHM se pueden dividir en dos grupos dependiendo de las ecuaciones implementadas para simular el flujo de agua de la zona insaturada al acuífero. Se tienen aquellos que utilizan la ecuación de Richards que considera el flujo en tres direcciones (Richards, 1931), tales como Hidrogeosfera (Therrien et al., 2006), CATHY (Weill et al. 2011), MODHSM (Panday y Huyakorn, 2004); Y PARFLOW (Maxwell et al., 2009), y los modelos que simplifican dicha ecuación sólo para flujo gravitacional, conocida como la ecuación de onda cinemática (KW) donde se desprecia el flujo insaturado lateral, en este grupo se encuentra el GSFLOW (Markstrom et al., 2008) el cual es el software a utilizar en la presente modelación.

### 2.2.1 Software integrado GSFLOW

GSFLOW es un software de libre distribución desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés, *United States Geological Service*), el cual integra la superficie terrestre, insaturada y saturada mediante el acoplamiento del PRMS (parte superior del dosel de la planta a la base de la zona del suelo) y MODFLOW-2005 (base de la zona de suelo a la base de los acuíferos, Incluyendo arroyos y lagos) como se presenta en la Figura 17.

El PRMS (en inglés *Precipitation Runoff Modeling System*) es un software igualmente desarrollado por el USGS, que permite evaluar los efectos de diversas combinaciones de precipitación, clima y la zona edáfica en el comportamiento de una cuenca. Con su implementación es posible determinar el balance de agua superficial, los regímenes de flujo de agua, las relaciones suelo-agua y la recarga de agua subterránea. Este discretiza la zona de estudio por medio de Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU, *Hydrological Response Units*), las cuales evalúan la captación y conducción de la precipitación de acuerdo a las corrientes definidas en la cuenca

El software de modelación por diferencias finitas, MODFLOW-2005, simula el flujo tridimensional de aguas subterráneas a través del medio poroso y su interacción con cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos, etc). Su análisis puede ser estacionario, donde el balance de entradas es igual al correspondiente a las salidas, como también se puede considerar el almacenamiento del agua en cierto periodo de tiempo conocido como transitorio.

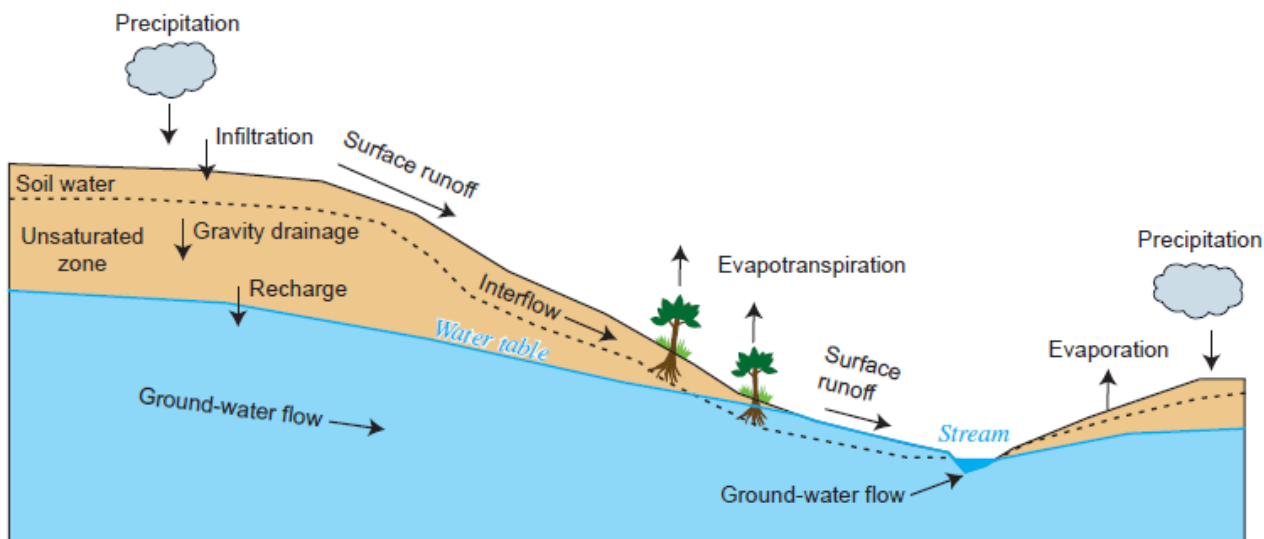


Figura 17. Modelo GSFLOW. Fuente: Markstrom et al., 2008.

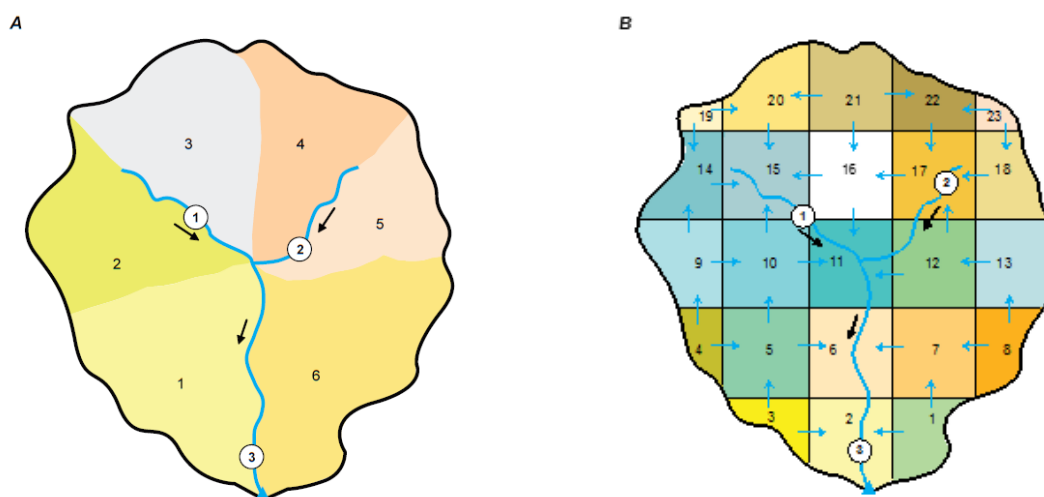


Figura 18. Discretización de cuenca A) PRMS por medio de HRU B) MODFLOW por malla. Fuente: Markstrom et al., 2008.

Los balances se calculan diariamente en PRMS para cada HRU y los flujos de salida se integran dinámicamente con MODFLOW a través de sus paquetes Unsaturated Zone Flow (UZF1) (Niswonger et al., 2006), Streamflow Routing (SFR2) (Niswonger y Prudic, 2005) y el paquete Lake (LAK3) (Merritt Y Konikow, 2000). Como se puede apreciar en la Figura 19, el PRMS abarca la llamada Región 1, que analiza la interceptación de la precipitación en la cobertura vegetal, la infiltración en la zona edáfica y la escorrentía superficial; el Modflow comprende la Región 2 que involucra las corrientes y lagos y la Región 3 que corresponde al flujo subterráneo.

La interacción entre las 3 regiones se ve reflejada en el intercambio de flujos, de la región 1 a la 2 con el flujo superficial y hipodérmico, la región 1 y 3 con el drenaje gravitacional o recarga para el acuífero y la descarga de agua subterránea una vez que la humedad del suelo es menor

a la capacidad de campo; y por último el intercambio entre la zona 2 y 3 propiciado por las diferencias de niveles piezométricos.

Todas las ecuaciones presentadas a continuación hacen parte del manual de ejecución del software GSFLOW (Markstrom et al., 2008).

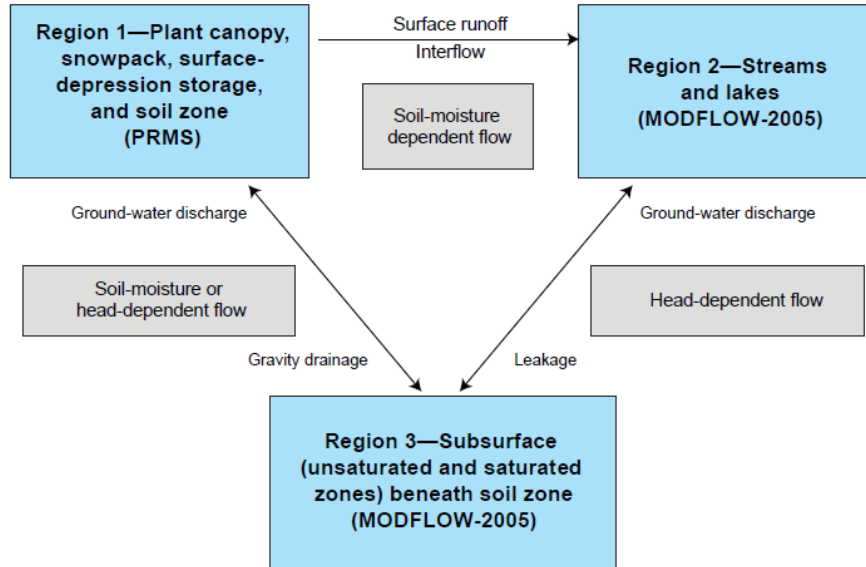


Figura 19. Interacción PRMS – MODFLOW. Fuente: Markstrom et al., 2008.

## 2.2.2 Región 1 - PMRS

### 2.2.2.1 Intercepción de la capa vegetal

Constituye la capacidad que tiene la cobertura vegetal para retener el agua lluvia, la cual dependerá del tipo de vegetación y su densidad en el área de estudio. Generalmente se considera que para zonas húmedas y amplia cobertura se puede interceptar alrededor del 10% de la precipitación, e igual a 0 para zonas áridas.

El GSFLOW calcula por cada HRU el volumen interceptado de acuerdo a la densidad de cobertura vegetal y el almacenamiento disponible de la misma siguiendo la Ecuación 2.1.

$$Spca_{HRU}^m = (Spcmx_{HRU} - Spc_{HRU}^m)(A_{HRU} \rho'_{HRU}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $Spac$  es el almacenamiento disponible en unidades de acre-pulgada, que corresponde a la diferencia entre el almacenamiento máximo ( $Spcmx$ ) y el almacenamiento de la cobertura vegetal en el intervalo de tiempo ( $Spc$ ), lo cual se multiplica por el área de la HRU ( $A_{HRU}$ ) y la densidad de la cobertura ( $\rho'_{HRU}$ ).

Obteniendo el volumen anterior es posible determinar la cantidad de precipitación que llega al suelo, simplemente restando dicho volumen captado por la cobertura vegetal (Ecuación 2.2). Si se presenta el caso en que el almacenamiento es mayor a la precipitación, todo sería interceptado por la vegetación (Ecuación 2.3).

$$P_{net_{HRU}} = P_{HRU} - \frac{Spca_{HRU}}{A_{HRU} \rho'_{HRU}} \quad \text{si } P_{HRU} > \frac{Spca_{HRU}}{A_{HRU} \rho'_{HRU}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$P_{net_{HRU}} = 0 \quad \text{si } P_{HRU} \leq \frac{Spca_{HRU}}{A_{HRU} \rho'_{HRU}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde  $P_{net_{HRU}}$  es la precipitación que alcanza el suelo y  $P_{HRU}$  es la precipitación total.

### 2.2.2.2 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración es el proceso donde el agua, que se encuentra de la superficie del terreno y retenida en las plantas, pasa de estado líquido a gaseoso por acción de la temperatura y la radiación solar. Existen métodos directos que reproducen fielmente las condiciones naturales de la zona de estudio, sin embargo son demasiado costosos. Por esta razón, se han presentado diferentes métodos empíricos cuyos resultados se aproximan a los escenarios reales. Dentro de los más conocidos es el propuesto por Penman en 1963, el cual necesita diversos parámetros, tales como la latitud de la estación, las horas de insolación, la temperatura, la velocidad del viento a dos metros sobre la superficie evaporante y la humedad relativa, que lo hacen dispendioso para su cálculo. Otros métodos más sencillos en su formulación son los de Turc, que ha dado en general valores más altos que los obtenidos con las medidas directas; la ecuación de Thornthwaite que ha dado resultados más bajos a los correspondientes a zonas áridas y semiáridas; y la fórmula de Blaney-Criddle, que depende de un coeficiente relacionado con el tipo de vegetación.

Para el cálculo de la evapotranspiración GSFLOW utiliza la formulación de Jense-Haise, como se muestra en las Ecuación 2.4 y Ecuación 2.5, la cual está en función de la temperatura del aire ( $T_{HRU}$ ), la radiación solar ( $R_{asw}$ ), el calor latente ( $\lambda$ ) y dos coeficientes ( $JH_{mes}$  y  $JH_{HRU}$ ) que se estiman de acuerdo a la altitud de la HRU, la presión de vapor y la cobertura vegetal (Jensen and others, 1969).

$$PET_{HRU} = JH_{mes}(T_{HRU} - JH_{HRU}) \frac{R_{asw_{HRU}}}{2.54\lambda_{HRU}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$\lambda_{HRU} = 597.3 - (0.5653T_{HRU}) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

### 2.2.2.3 Flujo de Horton e infiltración

Cuando se presenta una precipitación excesiva que supera la capacidad de infiltración del suelo se generan los procesos de escorrentía superficial, que de acuerdo a la topografía del terreno, fluyen hasta las corrientes o fuentes hídricas más cercanas. Se presenta con más frecuencia en regiones áridas y semiáridas, donde las intensidades de precipitación son altas y la capacidad de infiltración del suelo es reducida debido a la impermeabilización de la superficie, o en áreas pavimentadas.

Para su cálculo, el GSFLOW estima una proporción de la precipitación neta que alcanza el suelo y de la escorrentía acumulada, Ecuación 2.6, en función del porcentaje de área permeable de cada HRU.

$$ROh_{perv} = Fper_{HRU}(ROh_{up_{HRU}} + P_{net_{HRU}}) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde  $ROh_{perv}$  es la escorrentía de Horton ( $m^3/día$ ),  $Fper_{HRU}$  es la fracción de la celda que contribuye a la escorrentía ( $m^3/día$ ) y  $ROh_{up}$  es el flujo que procede de la celda anterior ( $m^3/día$ ).

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso que depende fundamentalmente de la precipitación que alcanza la superficie del terreno, el tipo de suelo y su porosidad. A medida que el agua se infiltra, la humedad del suelo se incrementa de arriba abajo por la disminución de la relación de vacíos entre las partículas que lo constituyen a través del tiempo, lo cual se conoce como capacidad de infiltración.

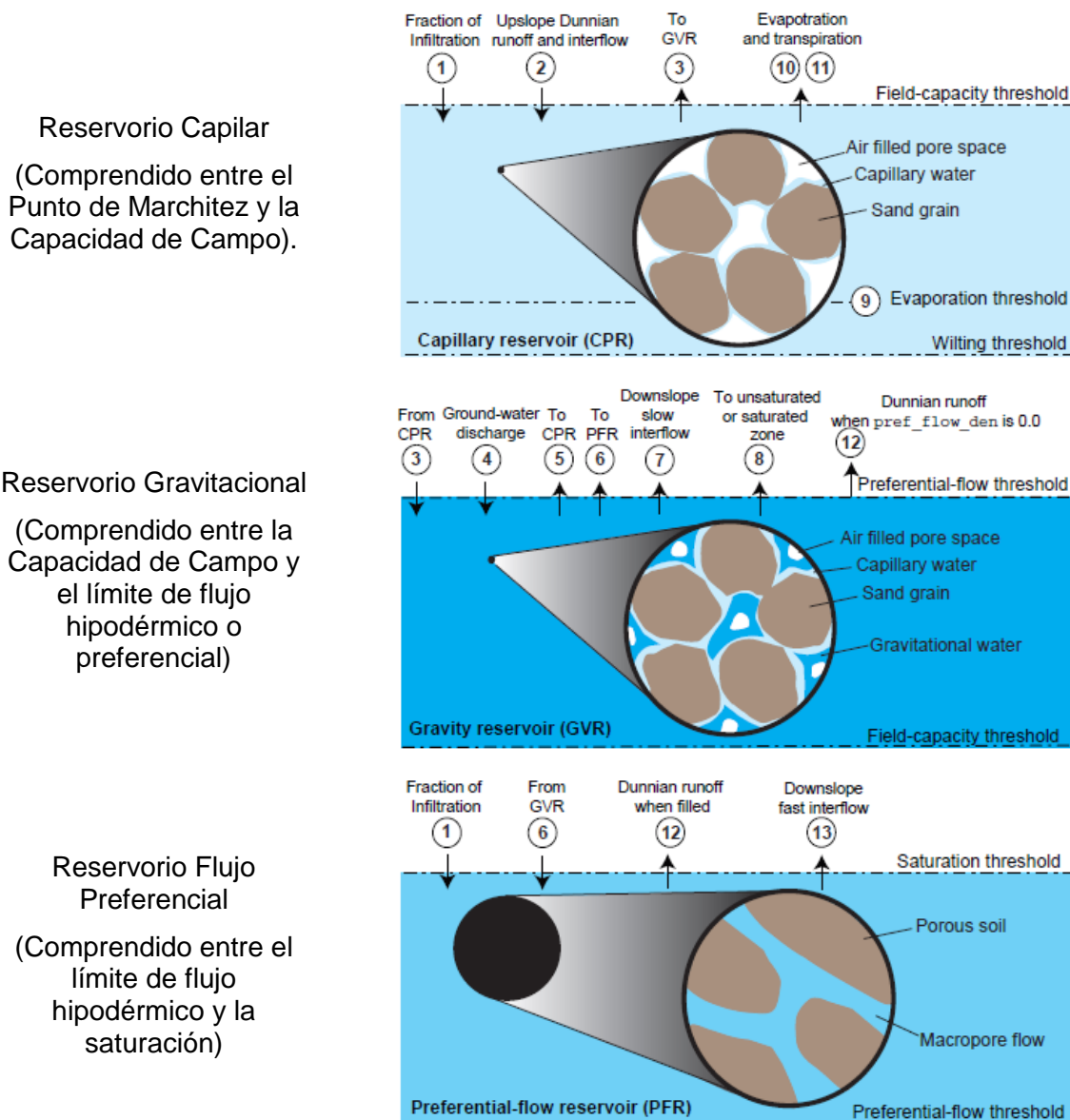
Para su cálculo se considera que es la diferencia entre la precipitación neta y el flujo hortoniano (Ecuación 2.7).

$$P_e = P_{net} - ROh \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde  $P_e$  es el flujo infiltrado ( $m^3/día$ ).

#### 2.2.2.4 El agua en el suelo

El agua se infiltra en el suelo de acuerdo a las condiciones de porosidad, capacidad de campo y contenido de humedad que lo caractericen. El almacenamiento del agua se conceptualiza en tres reservorios: depósito capilar, de gravedad y de flujo preferencial (figura 1).



**Figura 20. Clasificación de reservorios en la zona edáfica. Fuente: Markstrom et al., 2008.**

Estos reservorios ocupan el mismo espacio físico y representan diferentes procesos suelo-agua a diferentes umbrales de contenido de agua en el suelo. El reservorio capilar está limitado por el umbral de capacidad de campo. El contenido de agua en el suelo entre la capacidad de campo y la saturación del suelo define el embalse gravitacional.

El depósito de flujo preferencial es aquella parte del depósito de gravedad a partir de la cual tiene lugar el flujo intermedio rápido y está definida por el umbral de flujo preferencial (Markstrom et al., 2008).

### 2.2.2.5 Reservorio capilar

El reservorio capilar representa el agua retenida en el suelo por fuerzas capilares entre los umbrales de marchitez y de capacidad de campo. El volumen almacenado en este reservorio ( $S_{cap}$ ) proviene de la infiltración de la precipitación ( $q_i$ ) y los flujos hipodérmicos ( $q_{fs}$ ) procedentes de unidades superiores. La salida de agua se produce por medio de la evapotranspiración ( $ETR_{cap}$ ) y el flujo al reservorio gravitacional una vez se supera el límite de capacidad de campo ( $q_{GVR}$ ) (Ecuación 2.22).

$$q_i + q_{fs} = ETR_{cap} + q_{GVR} \pm \Delta S_{cap} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

### 2.2.2.6 Reservorio gravitacional

El depósito de gravedad representa el agua que queda retenida en el suelo y que drena de acuerdo al cambio de gradientes gravitacionales en la zona edáfica no saturada. Las entradas al reservorio corresponden al flujo del reservorio capilar ( $q_{GVR}$ ) y a la descarga de agua subterránea ( $q_{subt}$ ) en la zona del suelo siempre que el nivel piezométrico de agua subterránea en una celda de diferencia finita conectada sea mayor el dado en la zona edáfica. Se tienen cuatro opciones de flujo de salida:

- Flujo a reservorio capilar: Se produce cuando se tiene un déficit en este reservorio ( $q_{gvr-cap}$ ), cuando el contenido de humedad es mejor a la capacidad de campo (C.C), según Ecuación 2.9.

$$q_{gvr-cap} = C.C. - S_{cap} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

- Flujo a reservorio de flujo preferencial: Se tiene en el momento en que se supera el umbral de flujo preferencial ( $q_{fs}$ ) y el agua puede circular lateralmente en el suelo (Ecuación 2.10).

$$q_{GVR-fs} = q_{gvr} - q_{fs} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

- Flujo para recarga de acuíferos: Constituye al drenaje por gravedad que pasaría a la zona no satura del suelo y por lo tanto a la entrada al software MODFLOW. Se calcula como una función del almacenamiento en los depósitos de gravedad, depende de los niveles piezométricos del agua subterránea y de la conductividad hidráulica vertical de la celda de diferencias finitas a la cual está conectada, de acuerdo a la Ecuación 2.11.

$$q_r = Coef_{inf} \left[ \frac{q_{gvr}}{q_{fs}} \right]^{Coef.\varepsilon} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde el  $Coef_{inf}$  y  $Coef.\varepsilon$  son coeficientes relacionados al drenaje desde el reservorio de gravedad. Para conocer el contenido de humedad en el comienzo de la zona no saturada se sigue la relación de Brooks and Corey (Ecuación 2.12).

$$\theta = \left[ \frac{q_r}{K_s} \right]^{1/\varepsilon} (S_y) + \theta_r \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde  $K_s$  corresponde a la conductividad hidráulica vertical,  $S_y$  es la porosidad efectiva drenable igual a la diferencia entre el contenido de saturación ( $\theta_s$ ) y el contenido residual ( $\theta_r$ ). Cuando el flujo drando es superior a la conductividad vertical el contenido de humedad equivale a la saturación (Ecuación 2.13)

$$\theta = \theta_r \quad \text{Ecuación 2.13}$$



### 2.2.2.7 Reservorio flujo preferencial

Este reservorio representa el agua del suelo entre la capacidad de campo y la saturación que está disponible para el flujo intermedio rápido a través de aberturas relativamente grandes en el suelo de cada HRU.

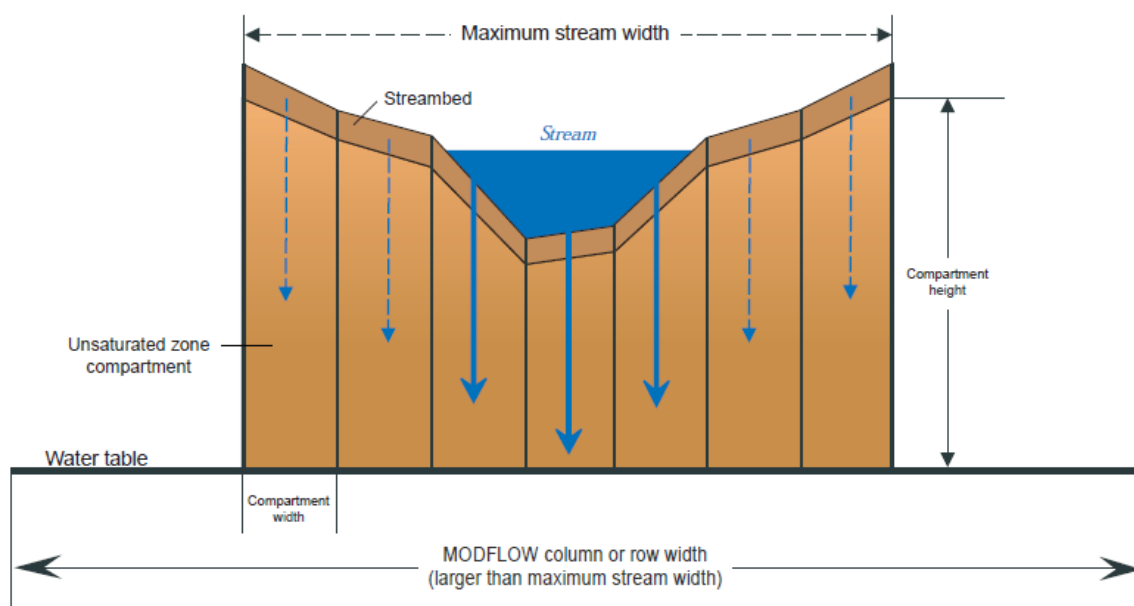
El flujo de salida de este reservorio corresponde al flujo hipodérmico y su exceso, de acuerdo a los niveles topográficos del terreno, puede emanar a la superficie como un manantial, o también conocido como flujo de Dunn.

El GSFLOW desarrolló el modulo “Soil-Zone” con el propósito de acoplar ambos software, el PRMS y el MODFLOW.

### 2.2.3 Región 2 – Corrientes

Para el acoplamiento del flujo tanto superficial como subterráneo con las corrientes existentes en la zona de estudio, se implementa el paquete SFR2 (por sus siglas en inglés *Streamflow Routing*) que hace parte de ModelMuse. Esta aplicación analiza el intercambio de flujo incluyendo la zona no saturada bajo el lecho del río, determinando si hay recarga o descarga del acuífero a la corriente (ver Figura 21).

El flujo no saturado se simula independientemente del flujo saturado dentro de cada celda del modelo que corresponda a una corriente, chequeando que el nivel piezométrico esté por debajo de la elevación del cauce. La relación entre la conductividad hidráulica insaturada y el contenido de agua se define por la función de Brooks-Corey, tal como se explicará en el apartado 1.5.1.



**Figura 21. Esquema de funcionamiento del paquete SFR. Fuente: Niswonger, R., 2005.**

La cantidad de agua que recarga una celda de la zona no saturada depende del grado de fluctuación del nivel freático. Si el nivel se eleva en una zona próxima a la saturación, entonces el aumento del nivel freático se exagerará porque hay poco espacio de poros vacío disponible para ser llenado por el flujo ascendente. Alternativamente, si el nivel está cayendo debido a la descarga o bombeo de aguas subterráneas en algún otro lugar, entonces se necesitará más tiempo para que un frente humectante de la zona no saturada llegue al nivel freático porque el contenido de agua es residual en el intervalo de tiempo que declinó.

La recarga resultante de una subida de la capa freática durante un paso de tiempo se calcula usando el nivel base de la zona no saturada y el nivel de agua al final del paso anterior. El flujo a través de la base se acumula para cada intervalo de tiempo. El volumen de agua en la zona

no saturada, que entró en la celda para elevar el nivel freático, se añade al volumen base. Esta suma se divide por el paso del tiempo para obtener una tasa de recarga volumétrica. Una vez que se ha resuelto la ecuación de flujo para el paso de tiempo, se calcula una nueva base de la zona no saturada en cada celda activa (Niswonger, R., 2005).

#### 2.2.4 Región 3 – Flujo subsuperficial

##### 2.2.4.1 Flujo en zona no saturada

Para analizar el flujo de percolación a través de la zona no saturada se utiliza la ecuación de Richards, que plantea la variación entre el contenido de humedad ( $\theta_w$ ) respecto al tiempo y cómo influye en la conductividad hidráulica ( $K_w$ ) de acuerdo a la Ecuación 2.14.

$$\nabla \cdot K_w(\theta_w) \nabla h_c + \frac{\partial K_w(\theta_w)}{\partial z} = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

El paquete de MODFLOW encargado de esta simulación es conocido como UZF1, por sus siglas en inglés Unsaturated-Zone Flow. Este realiza una simplificación de la ecuación de Richards mediante la ecuación de onda cinemática, la cual simula el flujo vertical en la zona no saturada de acuerdo a la variación de gradientes potenciales de gravedad como se expresa en la Ecuación 2.15, posteriormente, cuando se supera el nivel freático el flujo de considera tridimensional (Figura 22)

$$\frac{\partial K_w(\theta_w)}{\partial z} + \frac{\partial \theta_w}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 2.15}$$

El enfoque asume además propiedades hidráulicas uniformes en la zona no saturada para cada columna vertical de las celdas del modelo. La función de Brooks-Corey se utiliza para definir la relación entre la conductividad hidráulica no saturada y el contenido de agua (Niswonger, R., 2006).

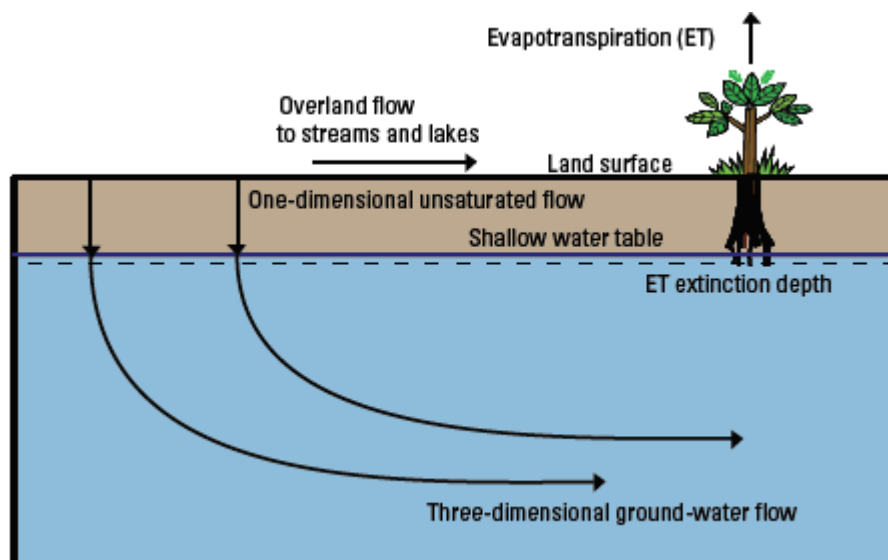


Figura 22. Acoplamiento de flujo vertical a flujo subterráneo en tres dimensiones.  
Fuente: Niswonger, R., 2006.



Las variables utilizadas por el paquete UZF1 incluyen el contenido de agua inicial y saturada, la conductividad hidráulica vertical saturada ( $Kv_s$ ) y un exponente en la función Brooks-Corey ( $\epsilon$ ). El contenido de agua residual ( $\theta_r$ ) se calcula internamente por el Paquete UZF1 sobre la base de la diferencia entre el contenido de agua saturada y el almacenamiento específico ( $S_y$ ).

La infiltración que se produce en la zona no saturada se transforma en humedad retenida en el suelo. Si la relación entre la tasa de infiltración ( $q_{in}$ ) y la conductividad vertical es menor a 1 y teniendo en cuenta las demás variables anteriormente mencionadas, el cálculo del contenido de humedad se realiza siguiendo la Ecuación 2.16. Cuando la tasa de infiltración es mayor que la conductividad vertical se considera que la humedad equivale al contenido de saturación.

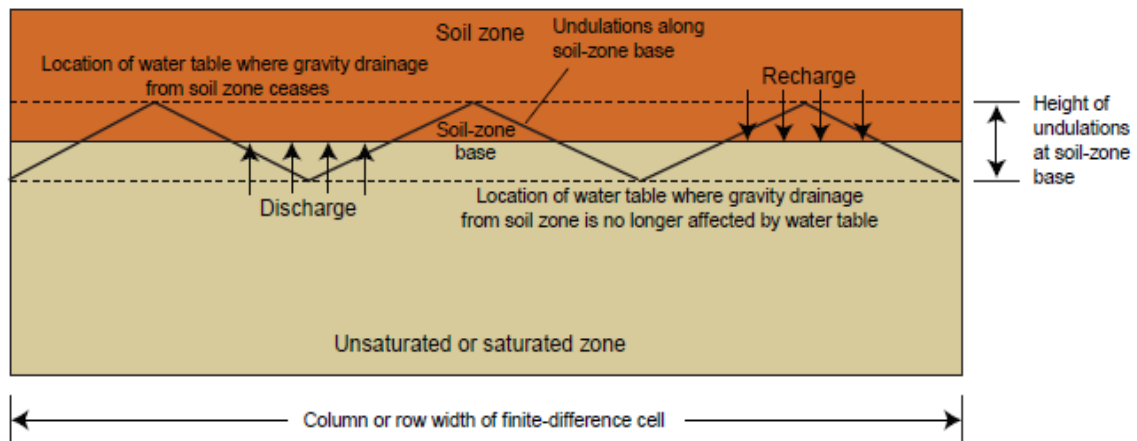
$$\theta = \left( \frac{q_{in}}{Kv_s} \right)^{\frac{1}{\epsilon}} (S_y) + \theta_r \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La recarga se añade al agua subterránea sólo cuando el agua en la zona no saturada drena al nivel freático. Cuando éste se eleva, la cantidad de agua almacenada en la zona no saturada por encima del contenido de agua residual se añade para recargar (Figura 23). Por lo tanto, la capa freática puede subir rápidamente cuando la cantidad de agua almacenada en la zona no saturada está próximo al contenido de humedad de saturación. El balance de agua para la zona no saturada se realiza independientemente del correspondiente al agua subterránea en MODFLOW (Niswonger, R., 2006).

Como se observa igualmente en la Figura 23, cuando se tiene el nivel piezométrico muy próximo a la cota topográfica, se puede producir un rechazo de la recarga del agua infiltrada. La tasa volumétrica de descarga de agua subterránea a la superficie terrestre se calcula sobre la base de la siguiente ecuación:

$$Q_{gw} = A_{cell} Kv \frac{(h - celtop)}{0.5 celthk} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde  $Q_{gw}$  es el flujo a reservorio gravitacional,  $A_{cell}$  es el área de la celda,  $Kv$  es conductividad vertical,  $h$  es el nivel freático,  $celtop$  es la cota topográfica y  $celthk$  es el espesor de la capa del modelo.



**Figura 23. Interacción de la recarga y descarga de flujo entre zona edáfica y la zona saturada.**  
Fuente: Niswonger, R., 2006.

### 2.2.4.2 Flujo subterráneo

El flujo en la zona saturada se rige por una ecuación diferencial parcial para un flujo tridimensional de agua subterránea (Ecuación 2.18).

$$\nabla(K\nabla h) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Donde K es la conductividad hidráulica que debe indicarse para las tres dimensiones, h es el nivel piezométrico, W son los flujos que entran o salen del acuífero y  $S_s$  es el coeficiente de almacenamiento.

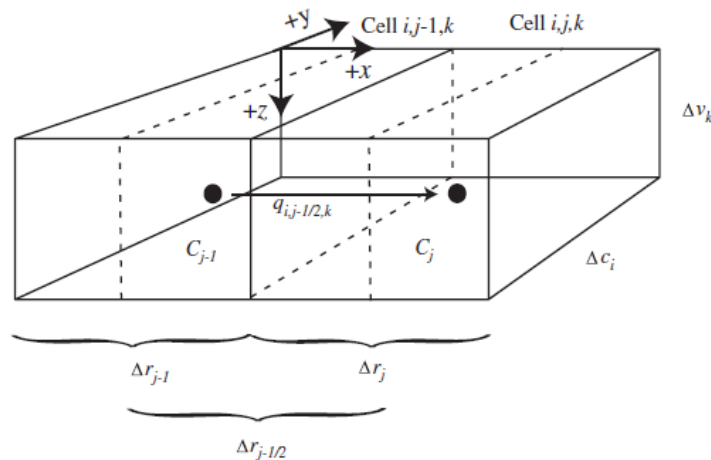
El MODFLOW discretiza el medio a través de una malla y resuelve la ecuación por medio de diferencias finitas, determinando el flujo que atraviesa cada celda y los niveles piezométricos en los centroides de las mismas. De acuerdo al esquema mostrado en la Figura 24, el balance de masa estaría representado por la Ecuación 2.19.

$$\Delta r_j \Delta v_k (q_{i+\frac{1}{2}} - q_{i-\frac{1}{2}}) + \Delta c_i \Delta r_j (q_{k+\frac{1}{2}} - q_{k-\frac{1}{2}}) + \Delta c_i \Delta v_k (q_{j+\frac{1}{2}} - q_{j-\frac{1}{2}}) + W = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta c_i \Delta v_k \Delta r_j \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde  $\Delta c_i, \Delta v_k, \Delta r_j$  son las dimensiones de las celdas y  $q_i, q_k, q_j$  el flujo en cada dirección.

Para determinar el flujo en una dirección, se aplica la ley de Darcy tomando la conductividad hidráulica de la cara de la celda que atraviesa el flujo (Ecuación 2.20).

$$q_{j-1/2} = C_{j-1/2} (h_{i,j-1,k} + h_{i,j,k}) \quad \text{Ecuación 2.20}$$



**Figura 24. Esquema de flujo mediante diferencias finitas de una celda a otra.**  
Fuente: Niswonger, R., 2008.

### 2.2.4.3 Modelación del bombeo

Los pozos de bombeo captan el agua del acuífero y por lo tanto son modelados con MODFLOW. El paquete que se implementa es conocido como WEL, el cual actúa como una condición de contorno de flujo específico en la celda del modelo donde se encuentra ubicado el pozo.

Sus parámetros de entrada corresponden al tiempo de inicio y fin y la tasa de bombeo, con los cuales es posible determinar el descenso del nivel del acuífero de acuerdo al radio de influencia del pozo.

### 2.2.5 Balance hídrico con GSFLOW

Como puede apreciarse en la Figura 25, GSFLOW discretiza el medio en cuatro zonas que se comunican entre sí de acuerdo al balance de sus componentes de entrada y salida. La primera corresponde a la superficie y luego viene la zona edáfica ambas modeladas por el software PRMS cuyas componentes se han explicado en los apartados anteriores; posteriormente se presenta la zona de percolación o zona no saturada y por último la zona saturada relacionada con el acuífero, las cuales están bajo el dominio del MODFLOW.

Las ecuaciones que definen los componentes de entrada y salida del sistema en cada región se definen a continuación.

- Zona superficial:

Como entrada principal al sistema se tiene la precipitación la cual se particiona en la infiltración, la escorrentía superficial.

$$P = P_e + q_H \pm \Delta S_s$$

Ecuación 2.21

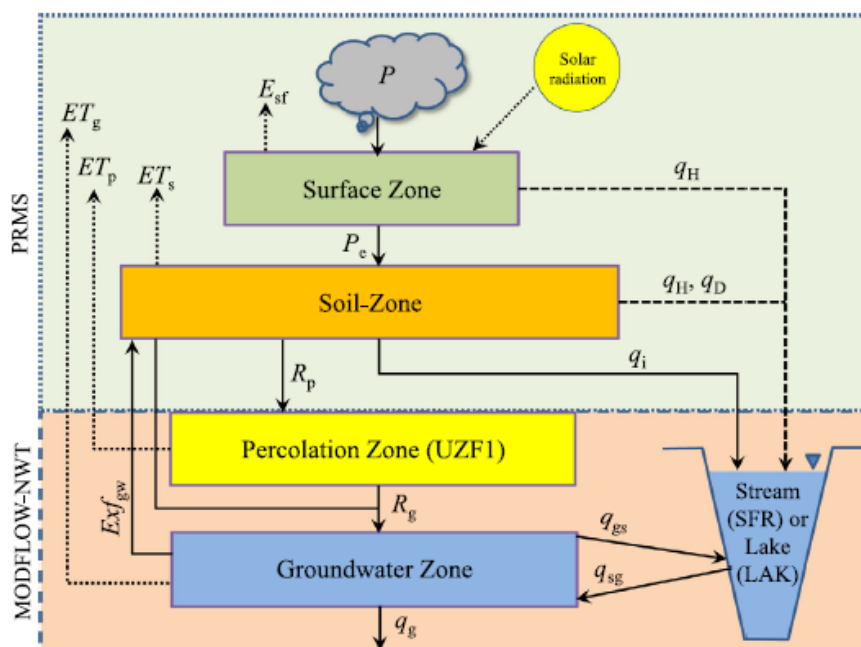


Figura 25. Balance acoplado entre las diferentes zonas del GSFLOW.

Fuente: Hassan T. et al, 2014.

- Zona edáfica

Sus componentes se explicaron en el apartado 2.2.2.4, de los cuales a medida que se tiene la infiltración va llenando los tres reservorios que la caracterizan: capilar, gravitacional y de flujo preferencial. El balance que se realiza en la zona edáfica tiene como entradas el flujo proveniente de la infiltración ( $q_i$ ), el intercambio que se realiza con la zona saturada ( $Exf_{gw}$ ) y el interflujo ( $q_{rup}$ ) que proviene de las HRU que se encuentran aguas arriba del punto estudiado. En cuanto a los flujos de salida se presenta, la evapotranspiración real, el drenaje por gravedad ( $q_g$ ), el cual actuaría como el flujo que percolación, el interflujo aguas abajo ( $q_{interdown}$ ) y el flujo de Dunne, que ocurre cuando se excede la capacidad de flujo preferencial. Los anteriores equivalen al almacenamiento que se produce en el interior de la zona, como se observa en la Ecuación 2.22.

$$P_e + Exf_{gw} + qi_{up} = ETR + R_p + qi_{down} + q_D \pm \Delta S_E \quad \text{Ecuación 2.22}$$

- Zona no saturada

Para las áreas de percolación, el balance hídrico define como entrada el flujo a gravedad proveniente de la zona edáfica y su componente de salida corresponde a la recarga del acuífero ( $R_{gw}$ ) como se muestra en la Ecuación 2.23.

$$R_p = R_{gw} \pm \Delta S_{NS} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

- Zona Saturada

El balance de las zonas subterráneas de agua se expresa como sigue:

$$R_{gw} = Exf_{gw} + Q_B \pm q_{sg} \pm \Delta S_{GW} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Donde  $q_{sg}$  es el intercambio de flujo del agua subterránea con los ríos, el cual define si el río es ganador o perdedor y va a definir el caudal base que debe respetarse para analizar la viabilidad del bombeo en la zona de estudio.  $Q_B$  corresponde al caudal bombeado y  $\Delta S_{GW}$  es el cambio en el almacenamiento del acuífero.

Con el balance de las zonas descritas es posible conocer el comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio por el periodo de tiempo modelado, determinando los cambios en los reservorios según la temporada de lluvias o verano. Adicionalmente, se puede observar el efecto de la implementación de una red de bombeo, para comprobar o rechazar la hipótesis de rebajar el nivel freático, que potenciaría la recarga artificial del acuífero sin afectar el caudal base de interacción río-acuífero.

## 2.3 MODELO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como ya se conocen las características de la llanura de inundación del oriente colombiano y la importancia del presente estudio para mitigar los efectos provocados durante la época invernal, se procede a definir el modelo acoplado de aguas superficiales y subterráneas, el cual permitirá conocer la viabilidad de la recarga inducida del acuífero por medio de bombeos.

La zona de estudio se localiza en el departamento del Casanare, dentro de los límites de la región afectada por inundaciones. Ésta se encuentra cercana a las estaciones meteorológicas Puerto Texas y Carimangua, las cuales poseen registros en su mayoría completos de temperaturas máximas y mínimas diarias así como también de precipitación (Ver Figura 26).

El polígono rojo enmarca la microcuenca del caño El Chuzo, el cual actuará como la corriente superficial a ser modelada. La elevación media es de 145m.s.n.m. y se posee una pendiente muy baja del 0.0055% que da la caracterización de un área plana. Principalmente se tienen pastos como cobertura vegetal, con profundidad de raíces entre 0.13 a 0.15m. El suelo se compone de limos arcillosos, cuyo nivel freático se tiene prácticamente a nivel superficial.



**Figura 26. Zona de estudio.**

Para el modelo de aguas subterráneas se define un acuífero libre, de espesor de 30m, el cual se compone por material aluvial del cuaternario (arenas saturadas), con transmisividad baja de acuerdo a los estudios realizados previamente.

Se definen los siguientes escenarios a modelar:

- 1) Modelo de las condiciones naturales de la zona, sin efectuar bombeos, durante un año de lluvias intensas.
- 2) Modelo aplicando una red de bombeo distribuida en la zona de estudio cerca de las corrientes, durante un año de lluvias intensas.
- 3) Modelo aplicando una red de bombeo distribuida en la zona de estudio lejos de las corrientes, durante un año de lluvias intensas.
- 4) Modelo aplicando una red de bombeo distribuida en la zona de estudio lejos de las corrientes aumentando el caudal extraído, durante un año de lluvias intensas.
- 5) Modelo de las condiciones naturales durante un año de bajas precipitaciones.
- 6) Las mismas condiciones del escenario 2 durante un año de bajas precipitaciones.

A continuación se describen las fuentes de información utilizadas para los datos de entrada del modelo, así como los parámetros tomados para su construcción.

### 2.3.1 Fuentes de información utilizadas

Los datos de entrada para el modelo consisten principalmente en:

- Información meteorológica para conocer precipitación y temperatura máxima y mínima.
- Parametrización de la superficie terrestre y del suelo para PRMS.
- Parametrización de la zona subterránea para MODFLOW-NWT.

#### 2.3.1.1 Información meteorológica

Los datos de temperatura y precipitación se solicitaron al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual tiene a su cargo la red de estaciones meteorológicas del país. Se escogieron las estaciones de Puerto Texas y Carimangua por la cercanía a la zona



de estudio así como también porque estaban en funcionamiento. Sin embargo, revisando los catálogos, se observó que en algunos periodos de tiempo faltaban datos, que puede deberse a fallos en las estaciones durante la adquisición de los mismos. El GSFLOW requiere registros de precipitación y temperatura día a día, por lo tanto se realizó un catálogo unificado que complementara dichos vacíos y fuera posible utilizarlo como entrada.

- Temperatura máxima y mínima

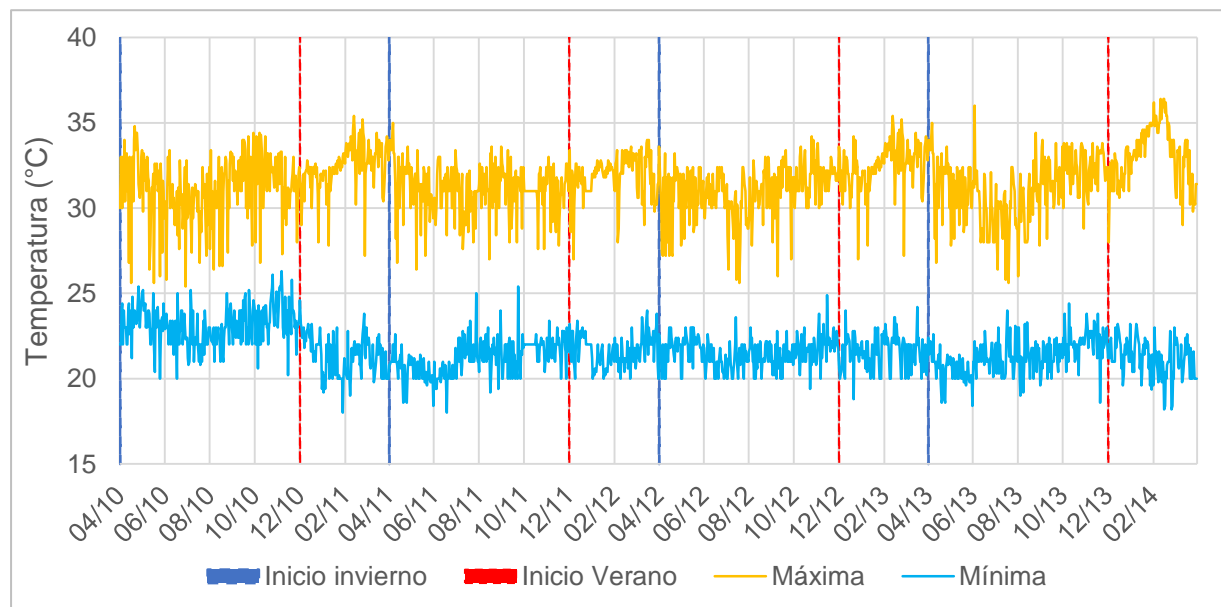
Se han tomado los registros desde el año 2010 al 2014 para analizar el comportamiento de la temperatura máxima y mínima en la zona de estudio.

La Figura 27 muestra la variación temporal de los registros. El catalogo se inicia desde el mes de abril, el cual marca el comienzo de la temporada de lluvias y es en este donde la zona edáfica ha superado la capacidad de campo y propicia la percolación del agua que recargaría el acuífero. Se finaliza en el mes de marzo donde igualmente culmina la temporada de sequías. Esta configuración es importante para establecer el balance hídrico anual y el comportamiento de los diferentes reservorios que componen el perfil del modelo (Zona superficial, zona edáfica, zona no saturada y zona saturada).

Como se expuso en capítulos anteriores la temperatura máxima media ronda los 31.5°C, sin embargo puede apreciarse que los mayores picos se tienen durante el verano, donde se superan los 35°C.

- Precipitación

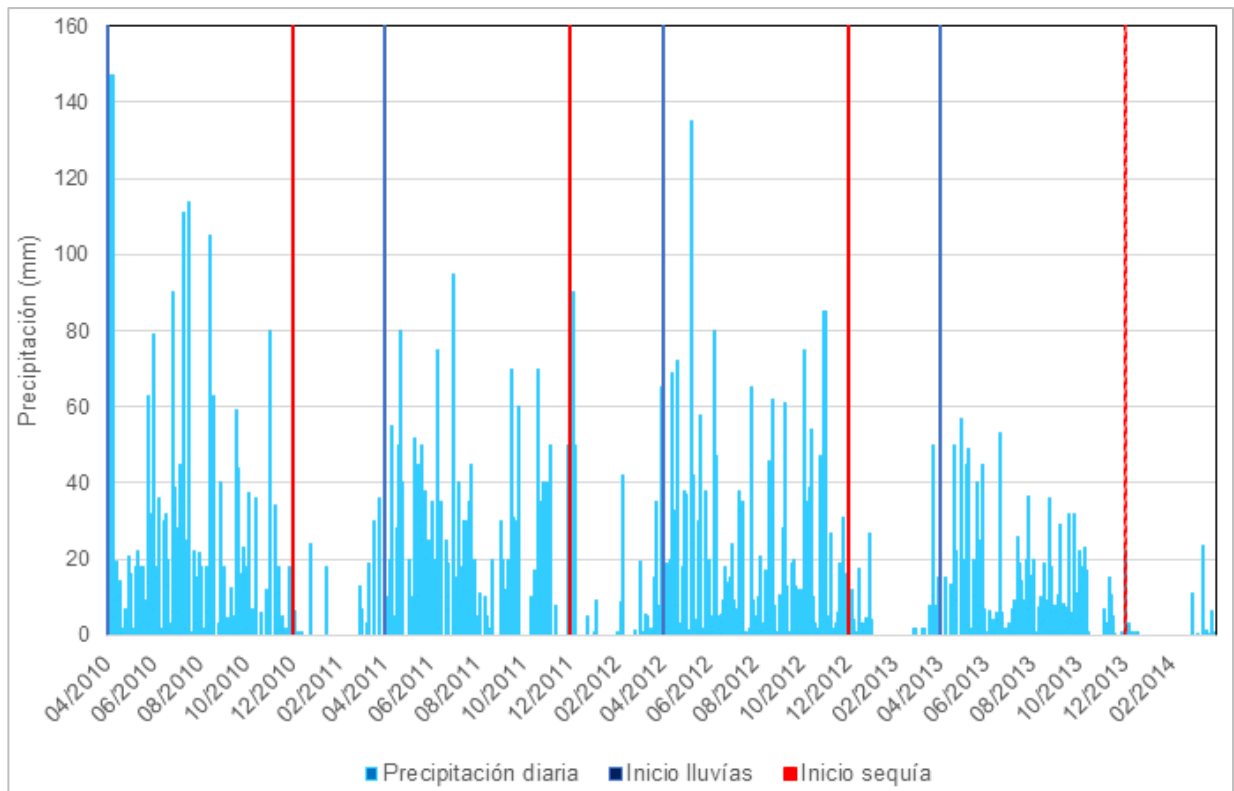
La Figura 28 muestra los registros de precipitación diaria para el periodo comprendido entre abril de 2010 y marzo de 2014. Se aprecia claramente la diferencia entre la temporada invernal y el verano; de abril a noviembre se presentan lluvias en la mayoría de los días que varían su intensidad pero que en total alcanzan alrededor de los 2400mm. Durante el verano se presentan algunas precipitaciones que aumentan conforme se acerca el mes de abril.



**Figura 27. Variación temporal de la temperatura máxima y mínima diarias periodo 2010 - 2014.**

Para el presente trabajo se consideran dos periodos de tiempo a modelar. El primero que comprende desde abril de 2010 hasta marzo de 2011, el cual converge con el fenómeno de la niña y se evidencia en los altos registros en las precipitaciones (2647mm/año). Con éste serán analizados los escenarios 1, 2, 3 y 4.

El segundo periodo analiza desde abril de 2013 hasta marzo de 2014, que registra altas temperaturas y bajas precipitaciones (1475mm/año). Su propósito es observar cómo funciona el bombeo bajo estas condiciones. Este concierne a los escenarios 5 y 6.



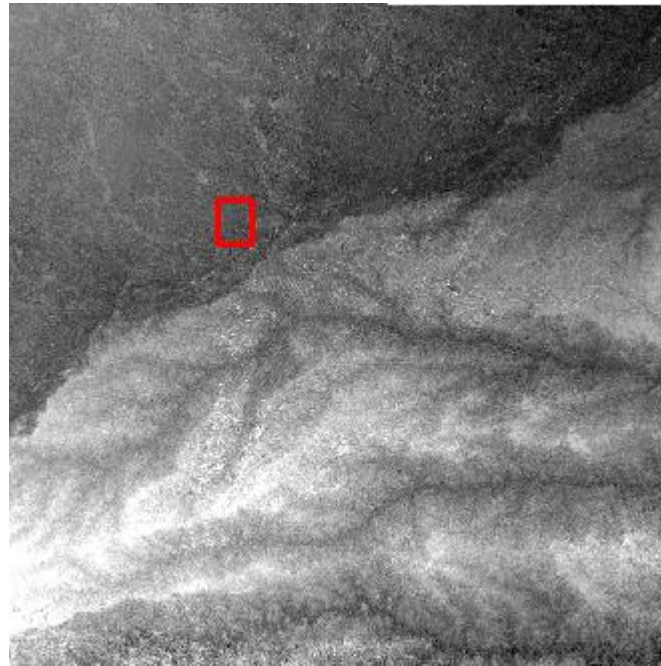
**Figura 28. Variación temporal de la precipitación diaria.**

### 2.3.2 Modelo digital de elevación (DEM)

El Modelo digital de elevación (DEM) se tomó de la base de datos del USGS en asociación con la NASA. Desde 2001, la NASA ha utilizado el radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica (ASTER) para producir modelos de elevación digital (DEM) de una sola escena (60 x 60 kilómetros) con una precisión vertical (error cuadrático medio cuadrado), generalmente entre 10 y 25, Metros (m). En la Tabla 2 se tienen las características del DEM utilizado.

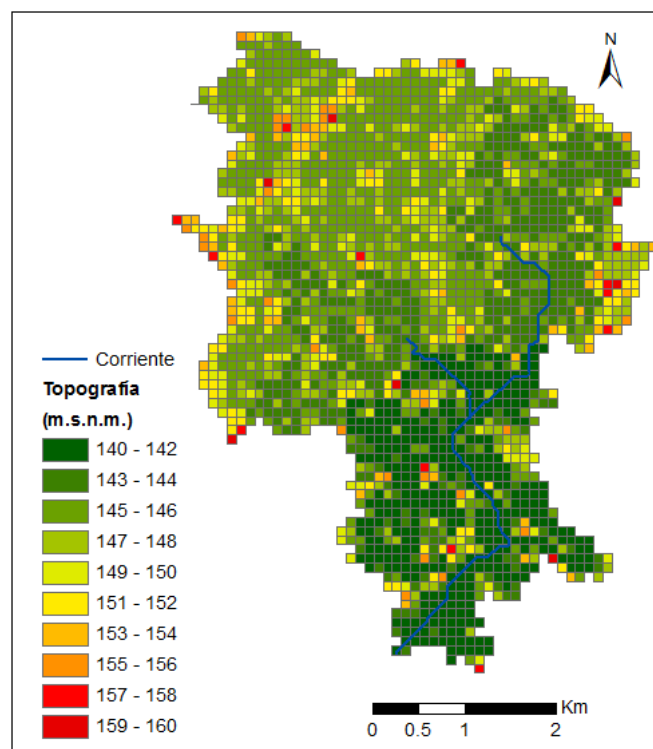
**Tabla 2. Características del ASTER GDEM**

Tamaño de ventana	3601 x 3601 (1° x 1°)
Tamaño pixel	1 arco-segundo
Sistema geográfico de coordenadas	Coordenadas geográficas latitud y longitud
Formato DEM	GeoTIFF, 16 bit, en unidades de metros Geoide WGS84/EGM96



**Figura 29. Modelo digital de elevación utilizado. En rojo se marca la zona de estudio.**  
Fuente: USGS, 2011

El GDEM 2, versión actualizada y utilizada en este estudio, tiene una precisión global de alrededor de 17 m con un nivel de confianza del 95% y una resolución horizontal del orden de 75 m (ver Figura 29).



**Figura 30. Mapa topográfico a partir de DEM.**

La Figura 30 muestra el mapa topográfico obtenido a partir del procesamiento del DEM con el software Arcgis. Se puede apreciar que la zona en su mayoría corresponde a una llanura con algunos sectores de colinas que tienen desniveles de alrededor de 5 metros. Hacia la zona sur se muestran los menores niveles que forman depresiones y es en aquellas donde se puede concentrar principalmente el agua acumulada tras el ciclo hidrológico.

### 2.3.3 Tipo de suelo

El tipo de suelo de la zona de estudio comprende arcillas y limos que se depositan en superficie mientras transcurren las inundaciones. La unidad geopedológica corresponde a Valles aluviales con pendientes menores al 7% y que presentan mal drenaje, según la clasificación USDA hacen parte del orden Entisol. Los entisoles son suelos recientes que se dan en planicies de inundación u otros depósitos recientes. Por lo anterior, los entisoles muestran la estratificación original del sedimento.

Las propiedades del suelo de acuerdo a su textura, han sido definidas por diversos estudios, tales como la porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez y permeabilidad saturada. En este caso, se considera un suelo arcillo-limoso de baja plasticidad cuyos parámetros son:

Clasificación (USGS/USDA)	CL	SiCL
Punto de marchitez (m.c.a./ pulgada)	0.21	8.26
Capacidad de campo (m.c.a./ pulgada)	0.34	13.38
Flujo preferencial (m.c.a./ pulgada)	0.43	16.93
Límite de saturación (m.c.a./ pulgada)	0.47	18.50

### 2.3.4 Cobertura del suelo

La cobertura correspondiente a la zona de estudio, se toma de la FIGURA 16. La región abarca principalmente zonas herbazales y pastos en la mayor extensión del área, y algunos bosques naturales en la ribera de los caños. Para el GSFLOW se define que el área se compone solo por pastos y que no cambian respecto a las estaciones de verano o invierno. Adicionalmente, se considera que éstos no poseen capacidad de interceptación de la precipitación.

### 2.3.5 Acuífero

Para definir el acuífero se toma como base los estudios evidenciados en el numeral 2.1. Se define un acuífero semiconfinado de 30m de espesor, el cual es el mínimo a partir del cual se encuentran reservas productivas y se pueda verificar el potencial de recarga. Está compuesto por trazas de arenas saturadas con transmisividad baja.

## 2.4 DEFINICIÓN DEL MODELO

Para la creación del modelo y definición de las Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU), se utiliza el software ARCMAP. Como dato de entrada se ingresa el DEM, del cual se ha extraído el área que se desea evaluar.

El DEM se procesa con el conjunto de herramientas Hydrotools del Arcmap, mediante las cuales se rellena de acuerdo a los cambios topográficos evidenciando la dirección y acumulación de flujo de las corrientes, posteriormente se delimita la cuenca y por ende el límite del modelo. El postproceso define muy bien la red de flujo del caño El Chuzo, que se compone de tres vertientes, y por ende tiene asociadas tres HRU's como se observa en la Figura 31. El área total del modelo es de 21,33Km<sup>2</sup>

Para la malla de diferencias finitas, se crea una grilla con dimensiones 5500 x 7100m, donde cada celda es de 100x100m. Tomando el contorno del modelo, las celdas activas son un total de 2133.

Uno de los elementos claves para realizar el modelo acoplado, es asociar cada celda al HRU que le corresponde. Sin embargo en los contornos, dos HRU comparten una misma celda, por lo tanto debe repartirse el área que le corresponde a cada una y de esta forma se crean las celdas denominadas gravitacionales o GVR. En la Figura 32 se muestra la grilla para el modelo de diferencias finitas y la asignación de cada HRU.

El modelo para MODFLOW-NWT consistió en una capa permeable con espesor de 30m, cuyas celdas se simulaban como convertibles, es decir, que indican la condición de acuífero libre (ver Figura 33). En la Tabla 3 se resume la configuración del modelo con las celdas activas y las HRU.

**Tabla 3. Resumen de modelo**

	Item	Und.	Valor asignado
Dimensiones	Área	Acres	5273
	Número de HRU	Und.	3
	Número de corrientes	Und.	3
	Dimensión grilla definida	m x m	5500 x 7100
	Dimensión celda definida	m x m	100 x 100
	Número de celdas activas	Und.	2133
	Número de celdas GVR	Und.	2298
	Número de celdas que contienen las corrientes	Und.	99



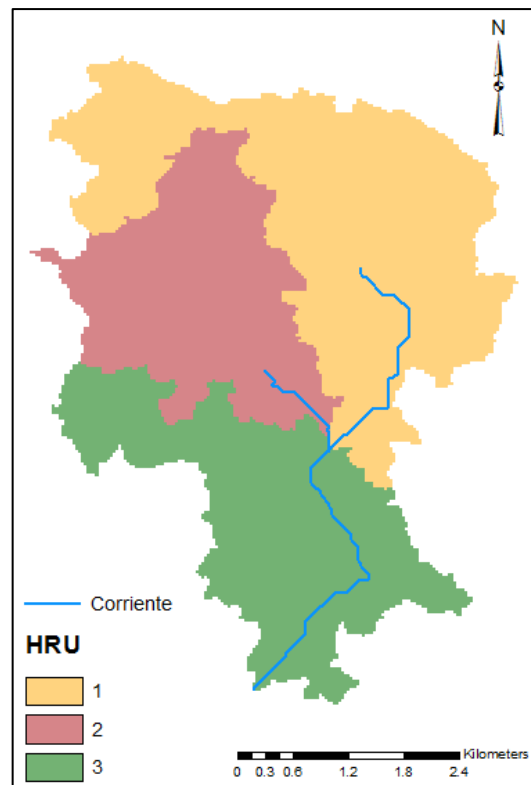


Figura 31. Definición de corrientes y HRU's.

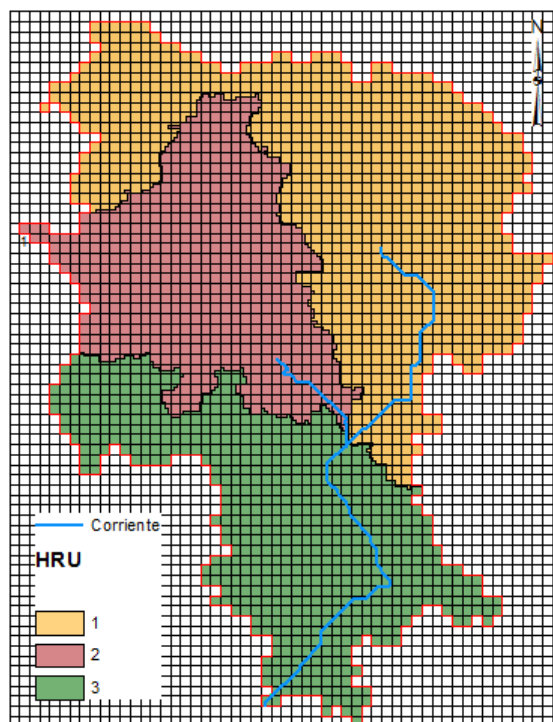
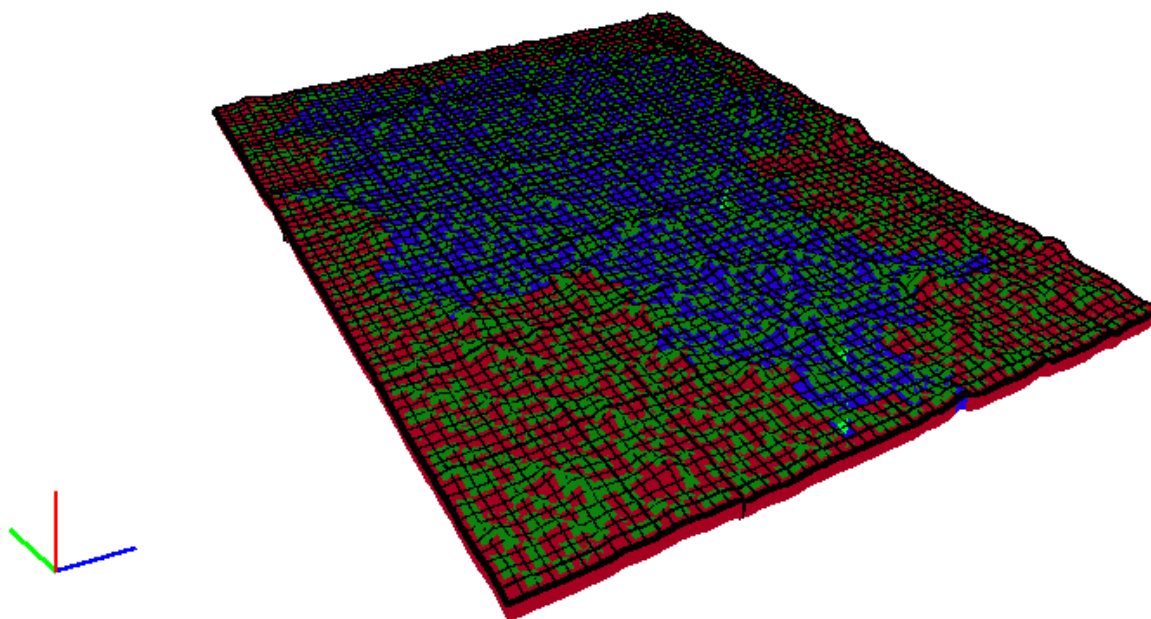


Figura 32. Modelo de diferencias finitas.



**Figura 33. Modelo de MODFLOW-NWT.**

#### 2.4.1 Datos de entrada para PRMS

Con la información recolectada se procede a definir los parámetros que solicita el programa PRMS. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se utilizaron las temperaturas mínimas y máximas diarias de las estaciones mencionadas del IDEAM, mientras que la radiación solar fue computada internamente por PRMS y distribuida a las HRU en base a la latitud, elevación mediana, pendiente y aspecto del centroide HRU. Se toma el mes de diciembre como inicio de transpiración, es decir donde baja el contenido de humedad respecto a la capacidad de campo por el comienzo del verano. El mes de abril se considera como fin de transpiración, ya que es el comienzo del periodo de lluvias y el contenido de humedad iguala la capacidad de campo.

En cuanto a la cobertura vegetal en el área predominan pastos, que debido a su tipología tiene una capacidad de intercepción de la precipitación mínima. Es por este motivo que se considera nula para el modelo y por lo tanto toda la precipitación alcanza la superficie del terreno. De acuerdo a literatura, los pastos poseen raíces de alrededor de 10cm de profundidad.

Para definir el reservorio capilar se toman los parámetros del suelo del subcapítulo 2.3.3. El contenido de humedad máximo se toma como el valor mayor entre la profundidad de raíces y la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM), que equivale a 5.1 pulg. Para este caso se toma el último valor, que igualmente se refiere al valor de la recarga máxima. En cuanto al contenido de humedad inicial, al tratarse de limos arcillosos que retienen gran cantidad de agua, se considera un 80% del contenido máximo.

El reservorio de flujo preferencial que define el movimiento libre del agua en la zona edáfica, se toma del 1% del reservorio total. Es un valor pequeño debido al tipo de suelo y a la baja pendiente del terreno que no propicia el flujo del agua sino que la mantiene.

En la Tabla 4 se reúnen todos los parámetros mencionados con sus respectivos valores.

#### 2.4.2 Datos de entrada para MODFLOW-NWT

En GSFLOW, el enlace entre PRMS y MODFLOW-NWT es manejado por los paquetes UZF1 y SFR2. El paquete UZF1 simula el flujo no saturado debajo de la base de la zona del suelo a la capa freática. Recibe agua como  $R_p$  diario de la zona del suelo para calcular  $R_g$  y  $Exfgw$ . Para la conductividad hidráulica no saturada, el exponente de la fórmula de Brooks y Corey (1966) fue de 3,5. El contenido de humedad se tomó como 25% de acuerdo a ensayos de laboratorio realizados cerca de la zona de estudio.

El paquete SFR2 se utilizó para simular el flujo de corriente de los segmentos del caño El Chuzo. De acuerdo a las imágenes de google Earth no es posible establecer un ancho definido y no se tiene información que especifique su profundidad, por lo tanto se optó por definir una sección rectangular de 10m de ancho (como una medida promedio aproximada) y una profundidad de 1m (Fotografía 4). Se consideró un espesor de lecho de 0.5m que se compone de material aluvial, la conductividad hidráulica se tomó una décima parte de la conductividad hidráulica del acuífero (0,1K) (Niswonger y Prudic, 2005) para representar la acumulación de sedimento fino en la superficie del lecho del río.

**Tabla 4. Resumen de parámetros ingresados en el PRMS**

<b>PRMS</b>			
<b>Item</b>	<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor asignado</b>
Evapotranspiración Potencial	Coeficiente de Jensen-Haise.		21.5
	Coeficiente de transmisión de onda corta de radiación.	-	0.062
	Mes de inicio de transpiración.	-	12 (Diciembre)
	Fin de transpiración.	-	4 (Abril)
	Temperatura inicio transpiración.	°C	25
Interceptación vegetal	Interceptación de lluvia en verano por vegetación.	pulg.	0
	Interceptación de lluvia en invierno por vegetación.	pulg.	0
Limites zona edáfica	Punto de marchitez	pulg.	8.3
	Capacidad de campo	pulg.	13.4
	Flujo preferencial, se toma como 95% de la saturación	pulg.	16.9
	Límite de saturación	pulg.	18.5
Reservorio capilar	Contenido de humedad inicial en reservorio capilar.	pulg.	4.1
	Contenido de humedad máximo en reservorio capilar. Se toma CC-PM	pulg.	5.1
	Recarga máxima de reservorio capilar	pulg.	5.1
Reservorio flujo preferencial	Coeficiente de flujo preferencial.	-	0.01



Fotografía 4. Vista del caño modelado. Fuente: Google Earth

Para la caracterización de las propiedades de flujo del acuífero, se consideró una conductividad hidráulica horizontal uniforme en toda la capa de 3.3 m/d, siguiendo los valores del estudio del IDEAM mostrados en el numeral 2.1, que precisan transmisividades bajas del orden de  $100\text{m}^2/\text{d}$ . La conductividad hidráulica vertical se tomó como una décima parte de la conductividad horizontal. El coeficiente de almacenamiento ( $S_s$ ) se asignó un valor de  $1.00\text{E}-05$  y para la porosidad drenable ( $S_y$ ) se pretende realizar una calibración del modelo utilizando valores de 0.01 y 0.1, de acuerdo a la información secundaria recopilada. En la Tabla 5 se encuentran consolidados los valores utilizados para el modelo.

Tabla 5. Datos de entrada para MODFLOW-NWT

Datos acuífero - MODFLOW NWT			
Espesor	En primera medida se toma solo una capa de acuífero	m	30
Tipo	Semiconfinado		
Ítem	Variable	Und.	Valor asignado
Propiedades de flujo	Conductividad hidráulica horizontal	m/d	3.3
	Coeficiente de almacenamiento ( $S_s$ )	$\text{m}^{-1}$	$1.00\text{E}-05$
	Almacenamiento específico ( $S_y$ )	-	0.01 - 0.1
Flujo en zona no saturada (Paquete UZF1)	Conductividad hidráulica vertical no saturada	m/d	0.01
	Exponente Brooks & Corey zona no saturada	-	3.5
	Contenido de agua saturada	-	0.46
Corrientes (Paquete SFR2)	Conductividad hidráulica en lecho	m/d	0.3
	Espesor lecho de corriente	m	0.5

#### 2.4.3 Definición de escenarios de modelación

Para analizar el efecto de la recarga inducida por medio de una red de bombeo se definieron tres escenarios que evalúan los efectos climatológicos y las características del acuífero para un periodo determinado. A continuación se describen cada uno.

#### 2.4.3.1 Escenario 1. Modelo acoplado de las condiciones naturales de la zona.

Este escenario contempla la condición natural de la zona para evaluar su comportamiento sin la presencia de los pozos de bombeo. Se utiliza el modelo descrito anteriormente analizando un periodo de un año, desde abril de 2010 hasta marzo 2011. Con los resultados se pretende establecer los valores de los flujos de entrada y salida en cada etapa del ciclo, estableciendo los volúmenes de almacenamiento que puede tener cada zona del subsuelo y por ende que volumen queda expuesto en superficie y que propicia los fenómenos de inundación.

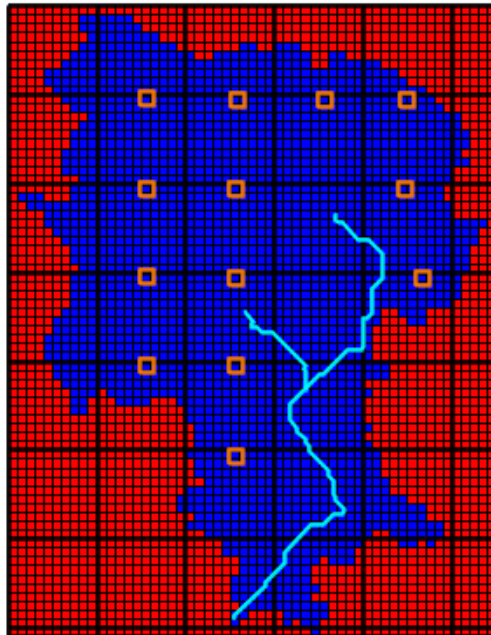
#### 2.4.3.2 Escenario 2. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, cerca de las corrientes.

Al igual que el primer escenario, se toma en consideración el modelo y el periodo de tiempo analizado. La red de bombeo se configura pensando en la facilidad de instalación de las tuberías de conducción entre pozos. La distancia entre ellos se definió de acuerdo al radio de influencia expresado como:

$$R = \sqrt{\frac{2.25Tt}{S}}$$

*Ecuación 2.25*

Donde R es el radio de influencia, T la transmisividad, t el tiempo y S el coeficiente de almacenamiento. Con los datos que caracterizan este modelo, los radios de influencia son 900m y 2865m para valores de S de 0.1 y 0.01 respectivamente. Para la red se considera que los pozos están separados entre sí cada 1000m, tomando como referencia el menor radio de influencia y mejorar la densidad de captación en toda la zona, de esta forma se espera reducir los niveles de inundación uniformemente (ver Figura 34).



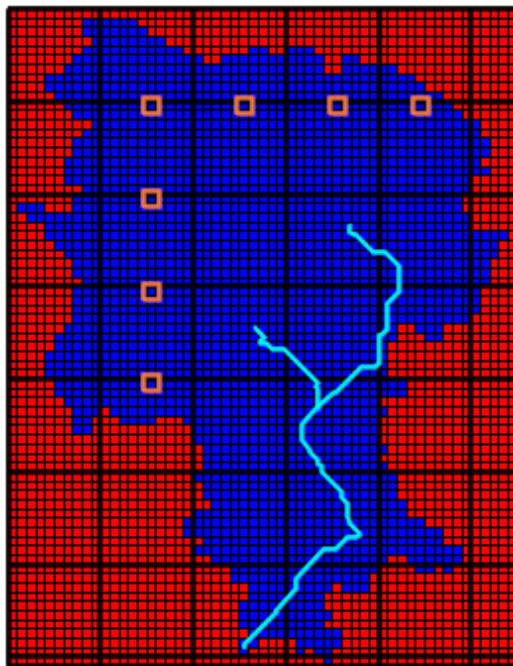
**Figura 34. Configuración de la red de bombeo para el escenario 2.**

Para el caudal de bombeo de los pozos se considera en primera instancia un valor igual al 50% de la recarga al acuífero, que se determina en el escenario 1, asegurándose que éste es menor al caudal de la interacción acuífero-río con el fin de no afectarlo, especialmente en la temporada de verano. En el capítulo de resultados se presentará el caudal establecido junto con los análisis.



2.4.3.3 Escenario 3. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, lejos de las corrientes.

En este escenario se distribuyeron 7 pozos ubicados lejos de las corrientes definidas como se observa en la Figura 35, implementando al igual que el escenario anterior un caudal de bombeo igual al 50% de la recarga natural que llega al acuífero.



**Figura 35. Configuración de la red de bombeo para los demás escenarios.**

2.4.3.4 Escenario 4. Modelo acoplado aplicando una red de bombeo distribuida en el área de estudio, lejos de las corrientes, aumentando el caudal bombeado

En este último escenario se toman las mismas características del escenario 3, sin embargo el caudal total extraído corresponde al 70% de la recarga natural.

2.4.3.5 Escenario 5. Modelo de las condiciones naturales durante un año especialmente seco

Se analizan las condiciones naturales de la zona de estudio durante el año 2013-2014, que se caracterizó por bajas precipitaciones y mayores temperaturas.

2.4.3.6 Escenario 6. Modelo implementando bombeo lejos del río durante un año seco

Este escenario evalúa la condición de bombeo siguiendo los mismos parámetros del modelo 3 para el año seco.

### 3 RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS MODELADOS

A continuación se mostrarán los resultados de cada uno de los escenarios modelados con el fin de establecer la viabilidad de implementar pozos de bombeo, sin causar afectaciones a los caudales ecológicos de la interacción acuífero-río. Para comparar las temporadas de lluvia y sequía se han tomado los días 18 de julio y 1 de febrero respectivamente.

#### 3.1 ESCENARIO 1: MODELO DE LAS CONDICIONES NATURALES DURANTE PERIODO DE LLUVIAS INTENSAS

##### 3.1.1 Comportamiento general

El periodo analizado corresponde al año hidrológico 2010-2011 mostrado en la Figura 36, caracterizado por intensas lluvias como efecto del fenómeno de la niña registrado. El total de precipitación alcanzó los 2647mm, la cual supera el promedio de los 2500mm anuales, presentando sus valores máximos a comienzos de abril y durante el mes de julio, posteriormente continúan fluctuando hasta el final de la temporada de lluvias (comienzo de diciembre). A partir de éste se observa una notable reducción e incluso periodos donde no se presentó ningún registro de precipitación (entre mediados de enero y febrero), es en el mes de marzo donde vuelven a comenzar los eventos, indicando el inicio de un nuevo ciclo.

Dada la caracterización del suelo, los limos-arcillosos no tienen la capacidad de infiltrar la totalidad de la precipitación registrada por lo que se puede observar que durante los eventos más significativos, parte del agua se transforma en escorrentía superficial o flujo de Horton ( $q_{\text{Horton}}$ ) el cual es el mayor contribuyente a la descarga a las corrientes definidas ( $q_{\text{Río}}$ ). Durante estos eventos que son frecuentes a lo largo del periodo de lluvias, dicha escorrentía tarda mucho en alcanzar los ríos debido a la baja pendiente que caracteriza la topografía de la región, permaneciendo inundada la zona, en especial en los sitios de depresiones como se evidencia en la Figura 37.

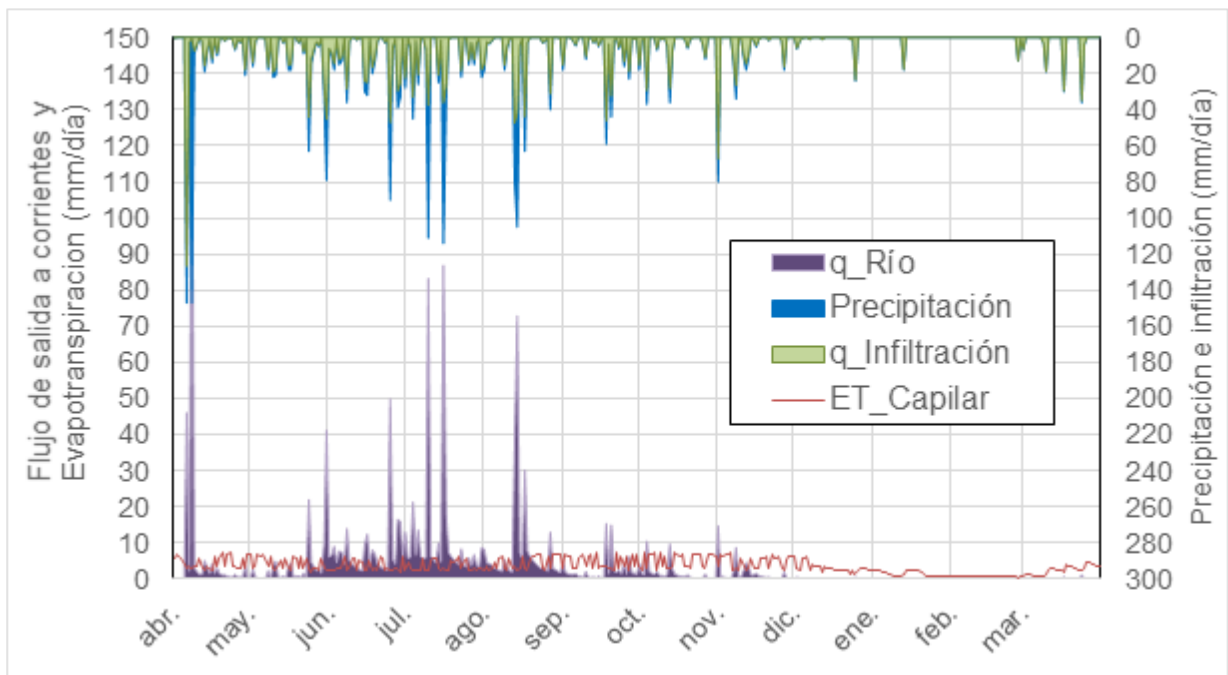


Figura 36. Flujos de la zona superficial para el periodo 2010-2011.

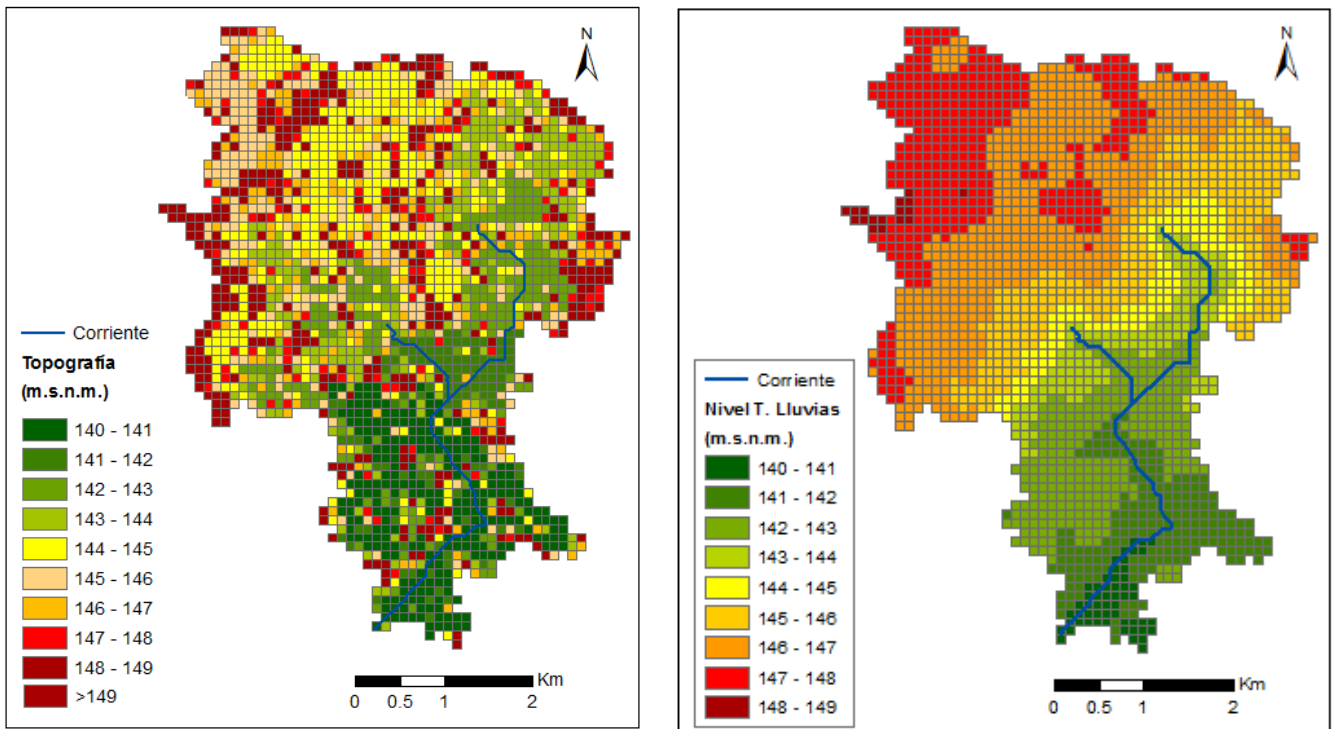


Figura 37. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias, tomando el día 18 de julio, con la topografía de la zona.

En contraste con lo anterior, la Figura 38 demuestra que durante la época de sequía los niveles se reducen por la ausencia de precipitaciones continuas sin embargo quedan algunas áreas inundadas, las cuales son utilizadas por la fauna de la región para aprovisionarse.

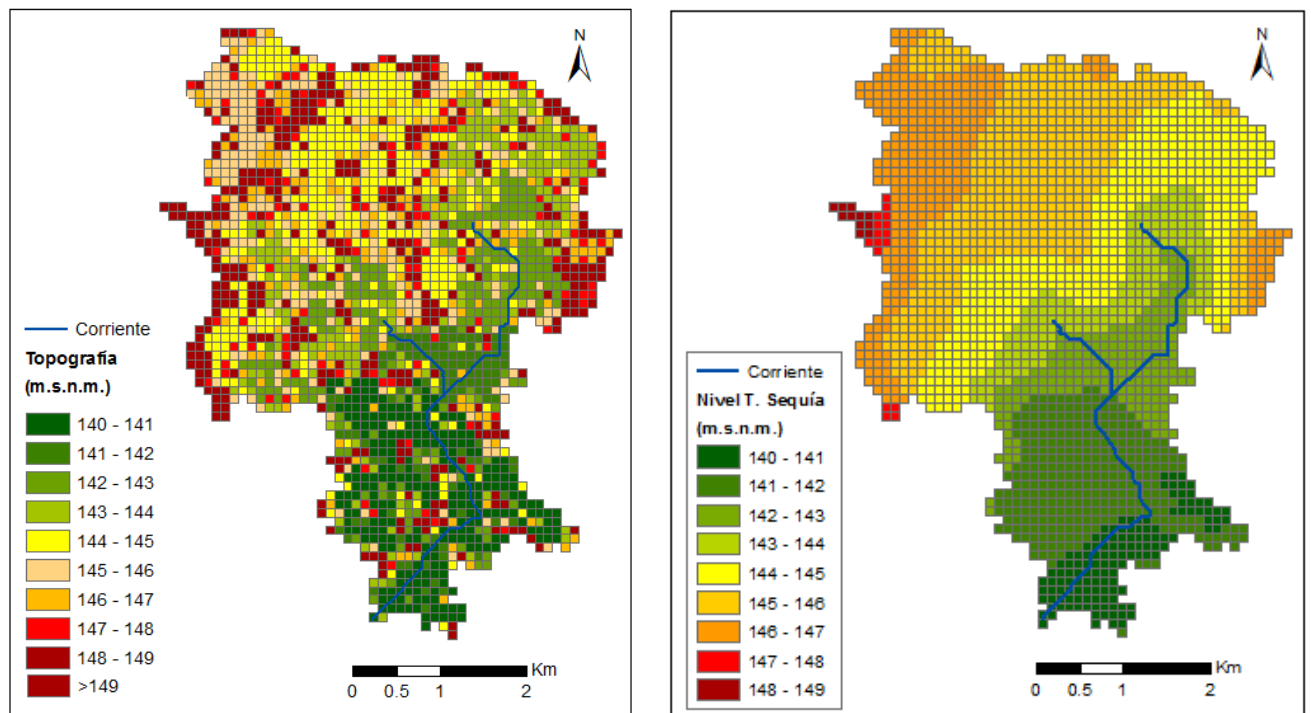
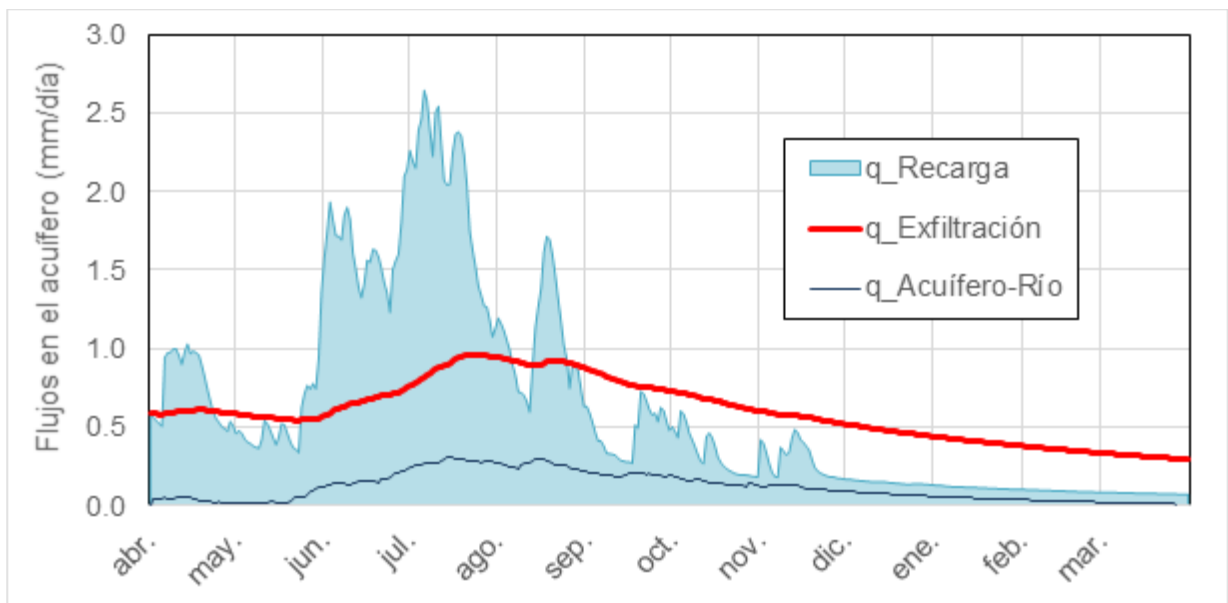


Figura 38. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias, tomando el día 1 de febrero, con la topografía de la zona.

El flujo infiltrado corresponde a un 70% de la precipitación total del año, a partir de éste se desencadenan los flujos hipodérmicos ( $q_{\text{Hipodérmico}}$ ), dunniario ( $q_{\text{Dunne}}$ ) en una proporción muy baja y el flujo de percolación, el cual propicia la recarga del acuífero. Pero la salida más importante en este reservorio concierne a la evapotranspiración, la cual es un 65% del total captado en la zona capilar. Su comportamiento es contante e igual a la potencial durante la temporada de lluvias debido a que el almacenamiento en los capilares está ocupado, caso contrario sucede en la época de sequía donde el reservorio se encuentra en su punto de marchitez.

Respecto al comportamiento del acuífero en condiciones naturales, la Figura 39 muestra la relación de los flujos de entrada, como es la recarga ( $q_{\text{Recarga}}$ ), y de salida como lo son la exfiltración al reservorio edáfico ( $q_{\text{Exfiltración}}$ ) y la interacción acuífero-río ( $q_{\text{Acuífero-río}}$ ). Nótese que la recarga neta ( $q_{\text{Neta}}$ ) es la diferencia entre la recarga y la exfiltración. Se puede apreciar que la máxima recarga diaria sólo alcanza los 2.6mm y en la época de sequía es prácticamente nula. De acuerdo a la Figura 40, la mayor recarga se encuentran en los puntos donde la topografía es más elevada y que están ubicados principalmente en el contorno del modelo. La exfiltración tiene un comportamiento relacionado con la recarga, sin embargo para los meses secos no se reduce de igual medida que ésta, lo que quiere decir que el acuífero está transfiriendo agua hacia los reservorios superficiales que se encuentran vacíos por la falta de lluvias. En la Figura 41 se aprecia que la exfiltración se concentra en los puntos más bajos de la topografía, inversamente a lo que ocurre con el proceso de recarga.



**Figura 39. Flujos de entrada y salida del acuífero en condiciones naturales para el periodo 2010-2011.**

La Figura 39 también evidencia que el acuífero está conectado a las corrientes, mostrando una condición “río ganador”, que es el comportamiento más importante para impedir que éste llegue a secarse. No obstante, se recalca que dicho flujo es bastante bajo, constituyendo sólo el 20% de la recarga al acuífero y que cuando se realicen los modelos con pozos de bombeo, se debe garantizar que éste no disminuya considerablemente. En la Figura 42 se muestra espacialmente la interacción acuífero-río, teniendo el mayor flujo en las cabeceras de los afluentes como es de esperarse y se reduce hacia el centro del tramo final. Para el periodo de sequía se aprecia que en este mismo sector, los niveles de agua se reducen de tal manera que el río llega a transferir agua al acuífero. Sin embargo cuando se realiza el balance general del día, el mayor flujo es el aportado por el acuífero.

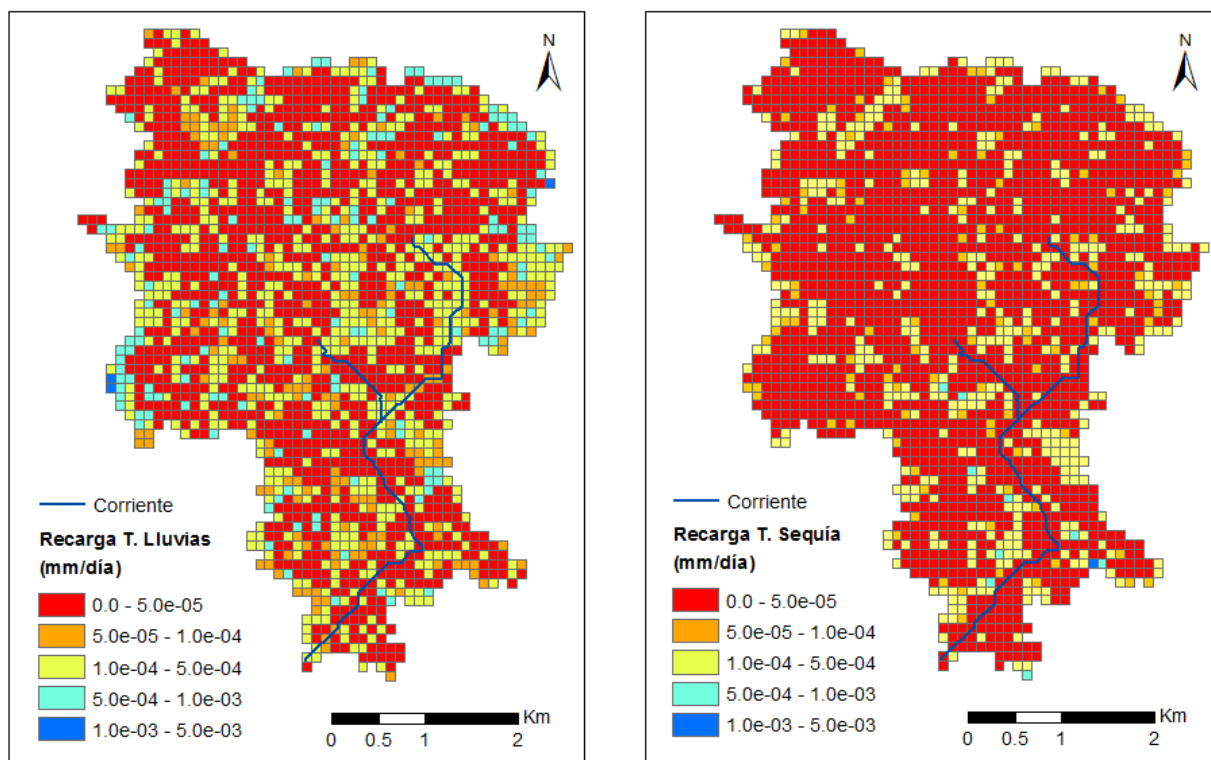


Figura 40. Recarga del acuífero en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).

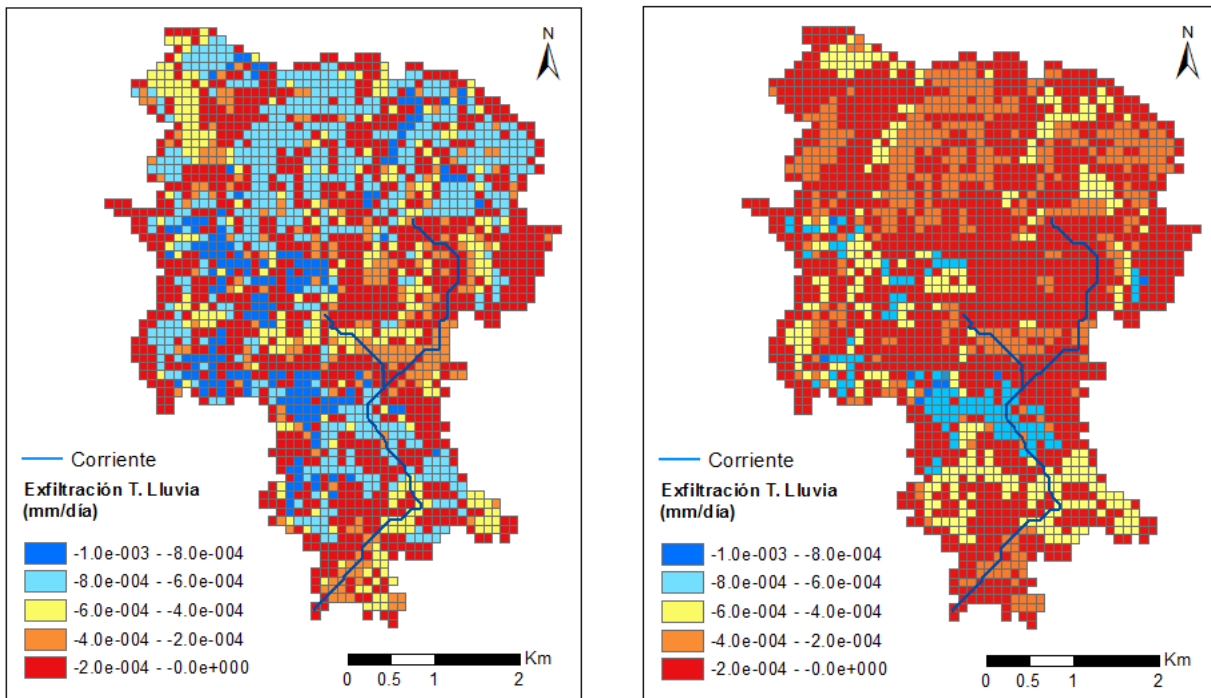
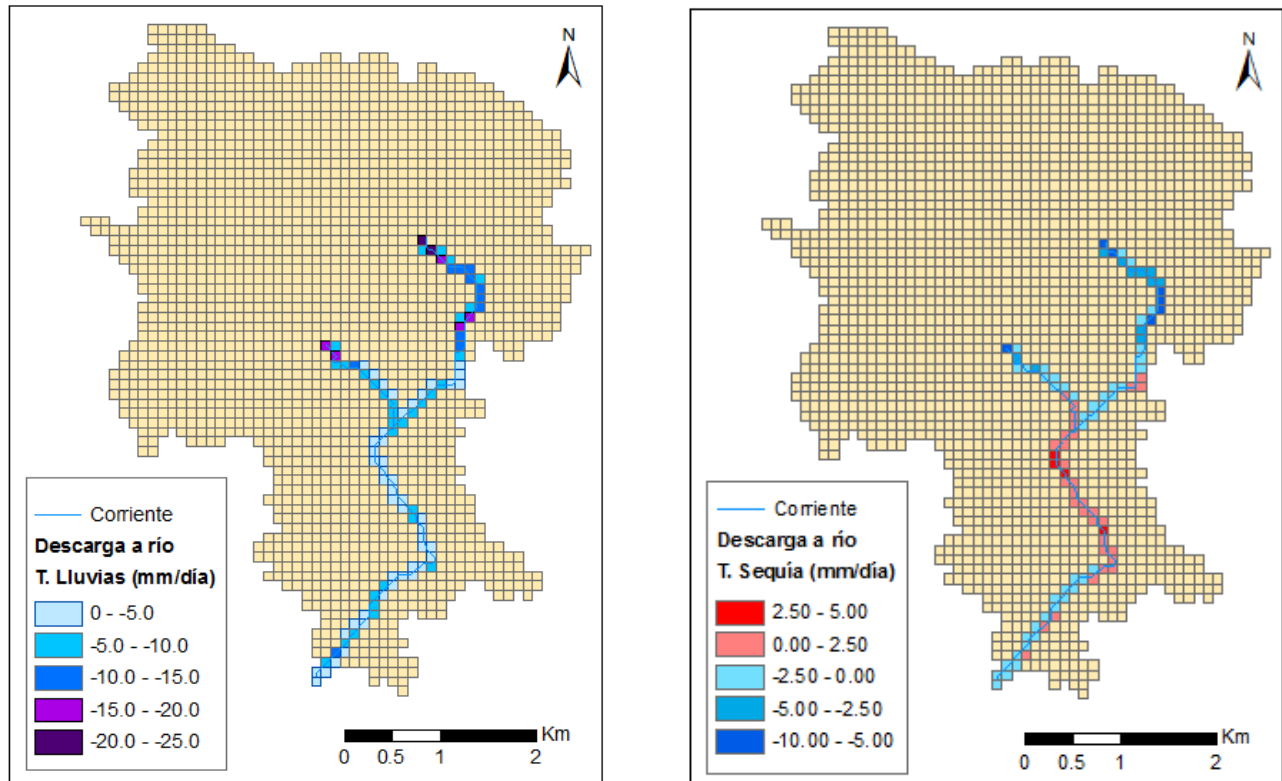


Figura 41. Exfiltración del acuífero en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).





**Figura 42. Interacción acuífero-río en condiciones naturales para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).**

### 3.1.2 Balance hídrico

El balance realizado en la zona de estudio se muestra de forma mensual en la Tabla 6 y en la Figura 43, los porcentajes calculados son respecto a la precipitación total registrada durante el periodo 2010-2011. Como se puede observar gran parte de la precipitación se infiltra en el suelo (69.5%) y el restante se transforma en escorrentía superficial como se había descrito anteriormente. Del flujo infiltrado el 50% sale del ciclo por medio de la evapotranspiración producida en la región capilar del suelo, el flujo hipodérmico que transcurre hasta las corrientes corresponde a un 18%, mientras que el flujo que vuelve a salir a superficie o flujo de Dunne solo alcanza el 0.12%, debido a que la zona tiene desniveles topográficos muy bajos. El flujo que percola a través de la zona no saturada llega prácticamente a recargar el acuífero, aunque sólo representa un 8.5% de la precipitación. Sin embargo, debido a que el nivel freático en la zona se mantiene muy superficial, esta recarga es rechazada en forma de exfiltración a la zona del suelo constituyendo el 7%. Adicionalmente, se debe tener en cuenta la interacción acuífero-río que corresponde al 1.6%.

Tabla 6. Balance mensual para el escenario 1. Año húmedo. Todos los valores están en mm/mes.

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Rio	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo démico	q_Acuifero- Rio	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
Abr	400.51	122.20	205.29	184.10	0.00	20.13	1.06	216.40	21.20	9.53	9.32	0.20	0.00	62.20	11.67	-0.86
May	333.81	133.25	106.96	83.56	0.00	22.52	0.87	250.25	20.48	9.68	9.28	0.40	0.00	83.26	10.81	-0.47
Jun	373.81	106.82	217.15	100.27	1.12	111.31	4.46	273.54	64.02	48.72	13.01	35.71	0.00	3.29	15.30	31.25
Jul	482.91	111.82	364.14	203.69	1.15	150.87	8.43	279.22	56.16	69.98	22.17	47.81	0.00	-18.61	-13.82	39.38
Ago	353.11	138.74	254.33	134.56	0.85	110.58	8.34	218.55	32.40	38.53	25.33	13.20	0.00	-38.70	-6.13	4.86
Sept	201.90	143.79	74.37	39.32	0.00	28.95	6.10	162.59	14.25	15.92	22.18	-6.25	0.00	-2.22	-1.68	-12.36
Oct	137.60	164.70	50.87	23.99	0.06	21.96	4.86	113.61	7.92	11.32	19.88	-8.57	0.00	-61.14	-3.40	-13.43
Nov	197.20	144.31	49.67	32.47	0.03	13.54	3.62	164.73	10.62	9.21	16.46	-7.25	0.00	12.68	1.41	-10.88
Dic	35.90	96.49	4.98	1.29	0.00	1.23	2.46	34.61	0.00	4.84	14.57	-9.73	0.00	-48.54	-4.84	-12.19
Ene	18.00	47.69	2.85	0.33	0.00	0.93	1.59	17.67	0.00	3.71	12.51	-8.80	0.00	-18.44	-3.71	-10.40
Feb	13.00	22.03	1.66	0.15	0.00	0.61	0.90	12.85	0.00	2.72	9.87	-7.15	0.00	0.08	-2.72	-8.05
Mar	99.00	79.24	3.78	2.57	0.00	0.67	0.53	96.43	0.00	2.51	9.64	-7.14	0.00	26.16	-2.51	-7.67
Total	2646.75	1311.09	1336.05	806.31	3.21	483.30	43.24	1840.44	227.04	226.65	184.23	42.42	0.00	0.03	0.39	-0.82
%	100.00%	49.54%	50.48%	30.46%	0.12%	18.26%	1.63%	69.54%	8.58%	8.56%	6.96%	1.60%	-	-	-	-

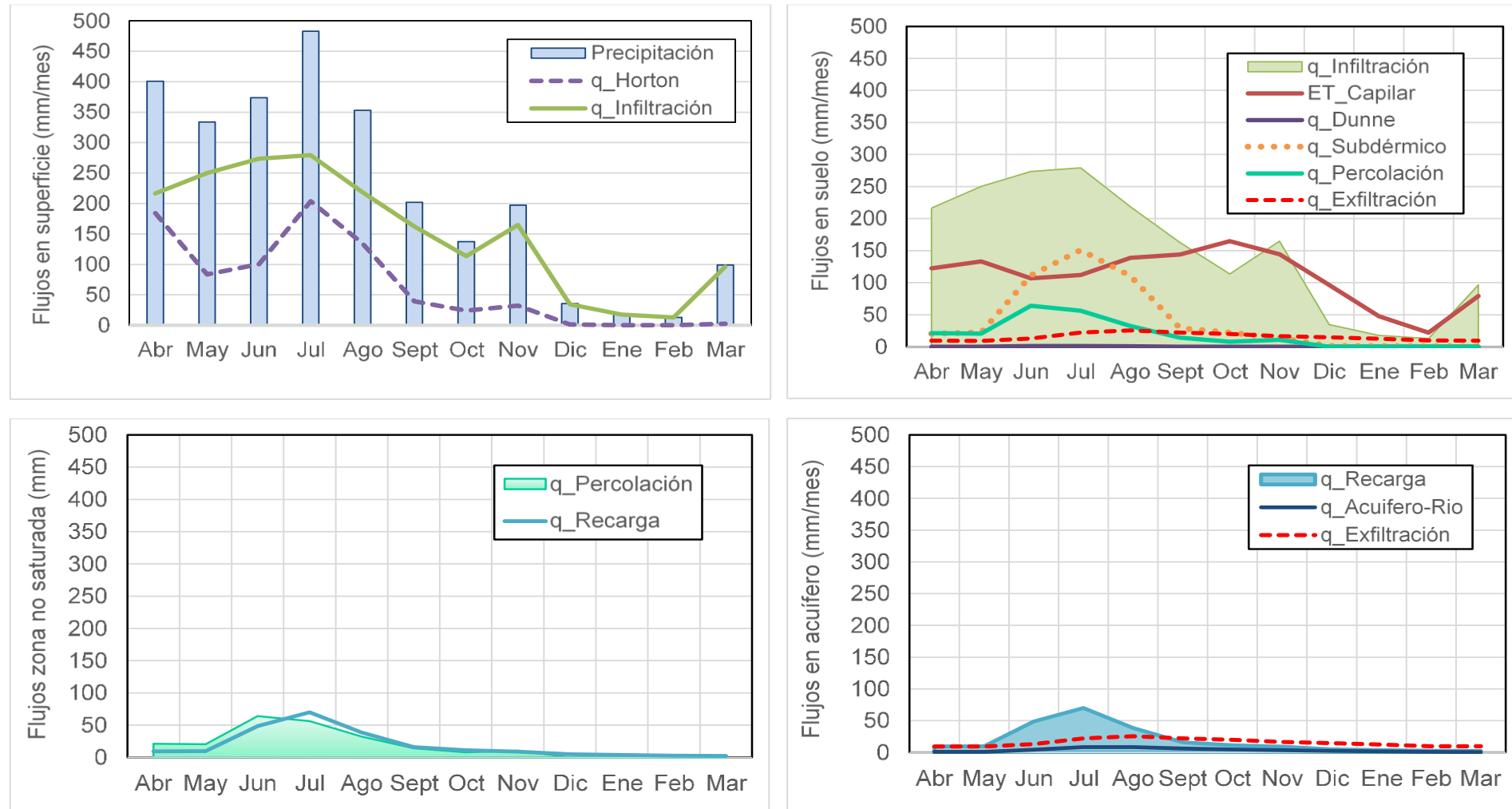
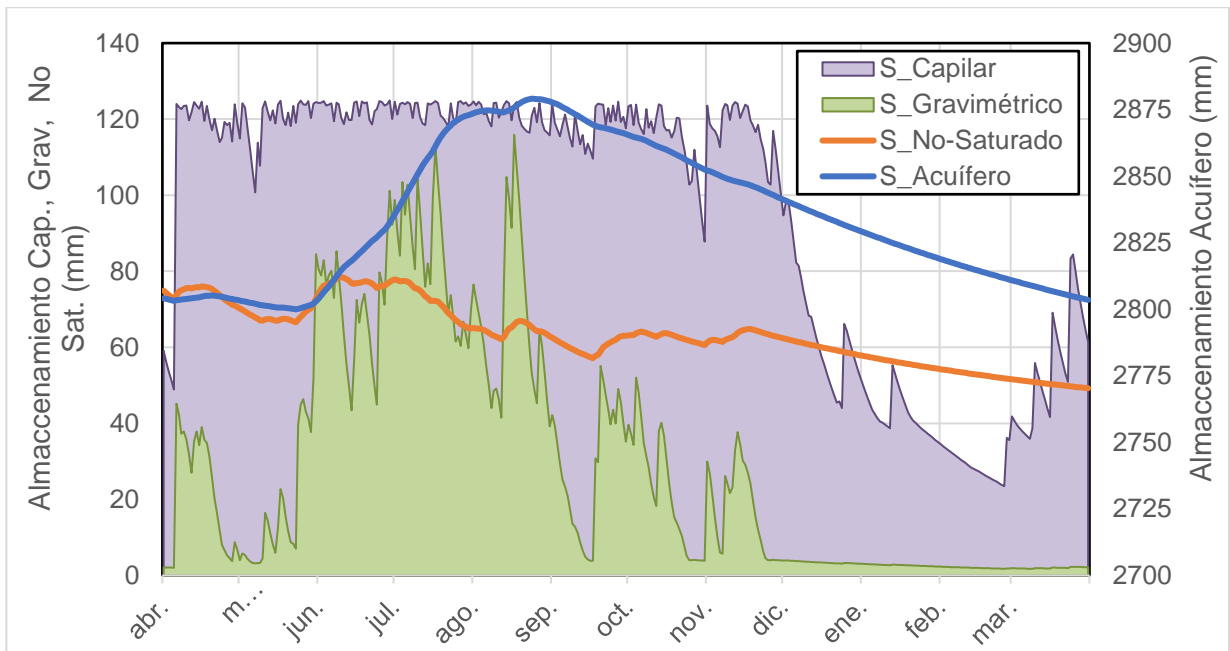


Figura 43. Balance mensual discriminando las zonas verticales que componen el modelo. Fuente: Elaboración propia

Para analizar la evolución en los almacenamientos de cada uno de los reservorios se presenta la Figura 44. El reservorio capilar alcanza su máxima capacidad con las primeras lluvias del ciclo, que se caracterizan por ser de gran magnitud, y de esta forma se mantiene con pocas fluctuaciones hasta que comienza la temporada de sequía en el mes de diciembre, donde se reduce progresivamente hasta rozar el punto de marchitez (23mm) a finales de febrero. En el reservorio gravimétrico, que conecta la zona suelo con el acuífero, actúa de manera oscilante conforme ocurren las precipitaciones y el flujo de agua va percolando al subsuelo.

La zona no satura, al ser pequeña por la cercanía del nivel freático a superficie, no presenta muchas variaciones y se mantiene constante respecto a los demás almacenamientos. Finalmente, el acuífero aumenta paulatinamente hasta que llega a su máxima capacidad en el mes de agosto, posteriormente, debido a la disminución de las precipitaciones y por ende al descenso en los niveles de los reservorios anteriores, el acuífero incrementa el flujo de exfiltración para compensar las pérdidas de agua y su almacenamiento se ve igualmente reducido.



**Figura 44. Evolución temporal del almacenamiento en cada una de las zonas del modelo.**

### 3.1.3 Análisis de sensibilidad

Como se había descrito previamente, de acuerdo a la información de estudios gubernamentales se presentan valores de almacenamiento entre  $0.1$  y  $1.5 \times 10^{-3}$ , por lo tanto se pretende realizar un análisis de sensibilidad para comprobar el efecto que dicho parámetro tiene en la recarga y descarga del acuífero.

En los siguientes gráficos se puede apreciar la variación de los flujos que entran ( $q_{\text{Recarga}}$ ) y salen ( $q_{\text{Exfiltración}}$ ) del acuífero así como la recarga neta ( $q_{\text{Neta}}$ ).

La Figura 45 muestra que los picos de recarga corresponden a  $S=0.01$ , los cuales corresponden a las mayores precipitaciones. De otra parte para el periodo de verano la recarga es ligeramente mayor para el almacenamiento de  $0.1$ .

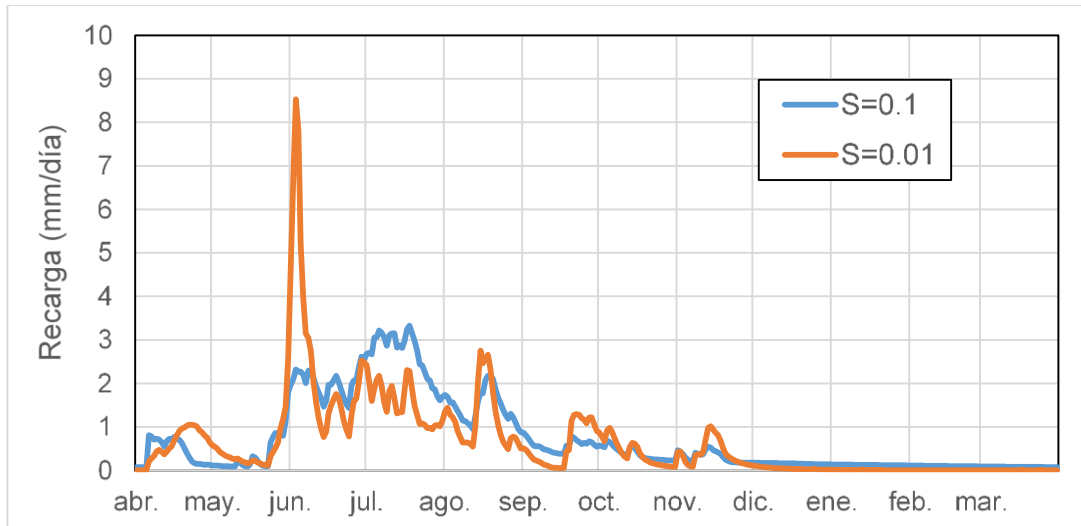


Figura 45. Flujo de recarga al acuífero según los valores de almacenamiento.

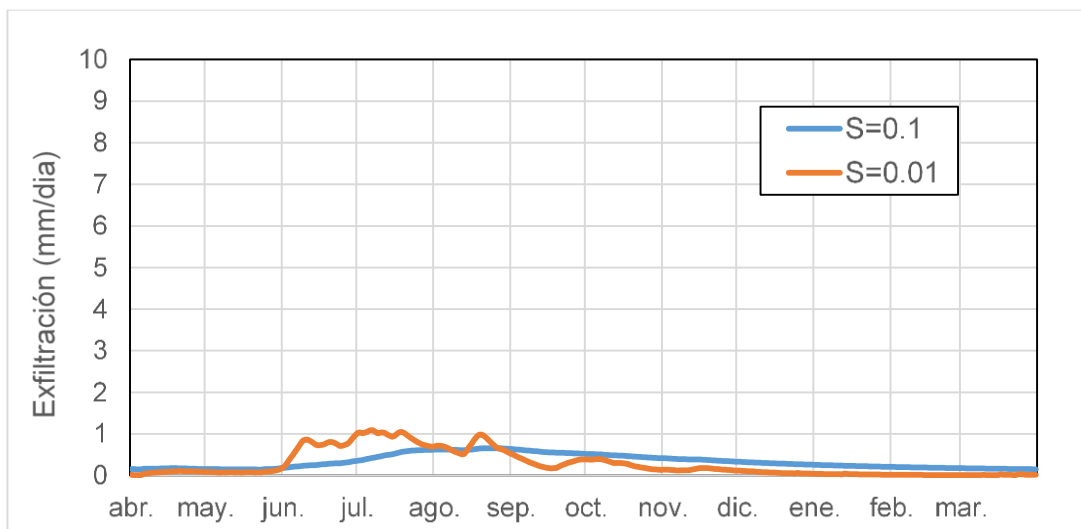


Figura 46. Exfiltración del acuífero a reservorio gravitacional según los valores de almacenamiento.

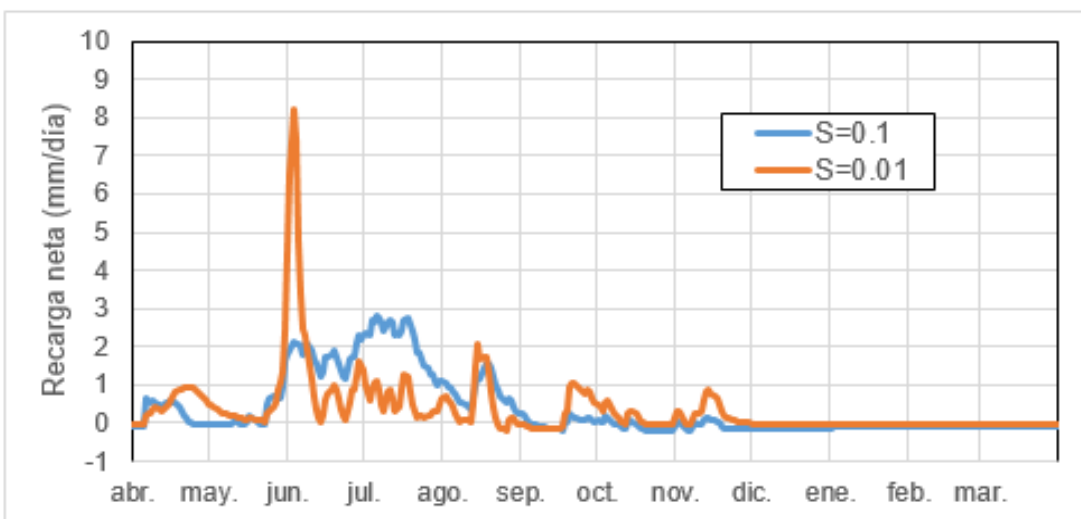


Figura 47. Recarga neta según los valores de almacenamiento.

La Figura 46 presenta la fluctuación del flujo que sale del acuífero al reservorio gravitacional, se observa que para  $S=0.1$  tienes un comportamiento relativamente constante y se presenta la mayor descarga en el mes de agosto. La exfiltración para el valor de  $S=0.01$  evidencia mayores cambios durante la temporada invernal y tiende a cero para los meses de verano.

De forma concluyente, la mayor recarga en el acuífero se observa en los meses de junio y julio cuando se trabaja con el almacenamiento de 0.1 como se puede apreciar en la Figura 47. También se debe mencionar que para ambas condiciones, la recarga no es suficiente y el acuífero está perdiendo flujo.

### 3.2 ESCENARIO 2: BOMBEO DISTRIBUIDO EN TODA LA SUPERFICIE

En este escenario se distribuyeron 13 pozos, 6 de los cuales se encuentran a menos de 50m de las corrientes definidas. El caudal definido para bombear corresponde al 50% de la recarga natural que llega al acuífero determinada en el escenario 1. Este caudal representa el 250% de la recarga neta. Por tanto, sólo será sostenible si se puede inducir recarga por reducción de la exfiltración o del retorno al río. La cuestión a resolver es cuál de estas componentes suplementa el bombeo.

Flujo recarga natural total ( $q_{\text{Recarga}}$ )	227mm/año = 13250.6m <sup>3</sup> /día
Caudal de bombeo (50% de $q_{\text{Recarga}}$ )	6625.3 m <sup>3</sup> /día
Caudal por pozo (13 pozos)	510 m <sup>3</sup> /día

#### 3.2.1 Comportamiento general

Cabe conjeturar con la puesta en marcha de los pozos de bombeo se rebaja el nivel freático y promueve la infiltración del agua que queda sobre la superficie como escorrentía de Horton. En la Figura 48 se observa que el nivel se reduce considerablemente de un escenario a otro, siendo más notorio hacia la zona nor-oeste para la temporada de lluvias.

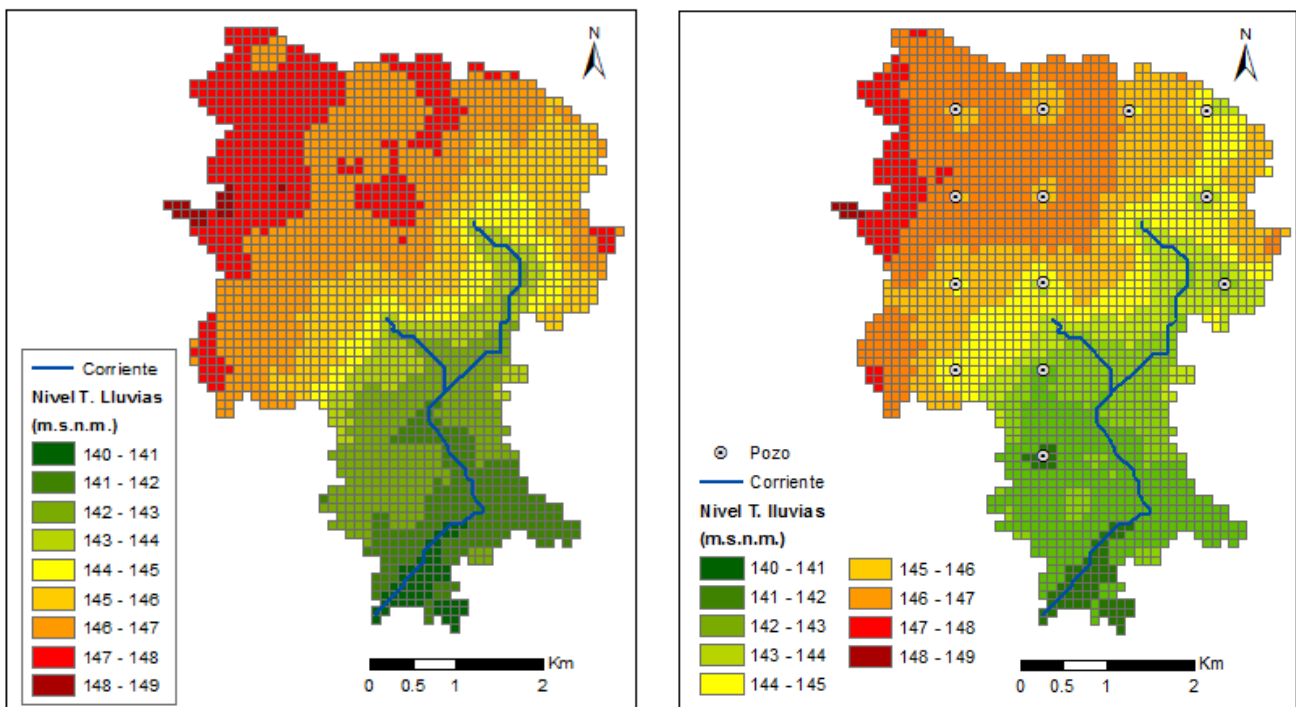
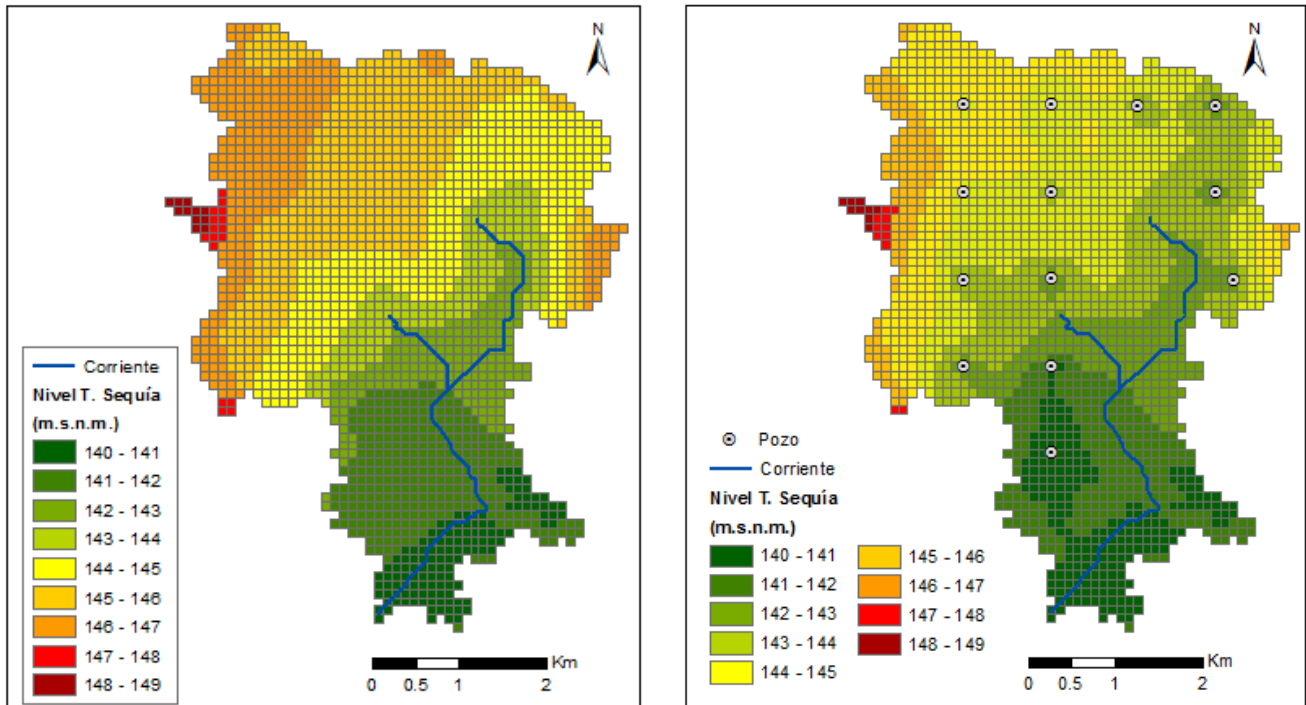


Figura 48. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 2 (a la derecha).



Para la temporada de sequía es más apreciable la reducción de los niveles respecto a la condición natural, pudiendo afectar la interacción río-acuífero disminuyendo el flujo como se observa en la Figura 49.



**Figura 49. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 2 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia**

La interacción acuífero-río se ve altamente afectada a lo largo del tramo inferior para la temporada de sequía teniendo una reducción del caudal de aproximadamente el 26% con respecto a la condición natural (ver Figura 50 y Figura 51).

Como se esperaba se observa un incremento en la recarga en toda la zona, siendo más significativa para la temporada de lluvias (Figura 52). La exfiltración sigue concentrándose en las mismas áreas de la condición natural aunque se aprecia una leve reducción en la Figura 53.

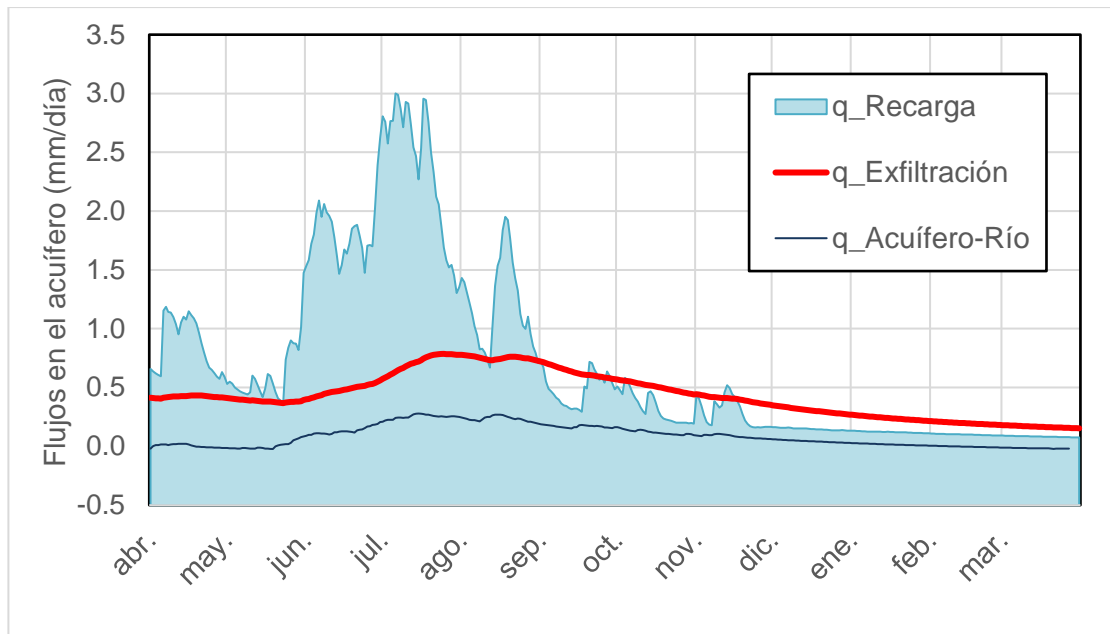


Figura 50. Flujos en el acuífero para el escenario 2.

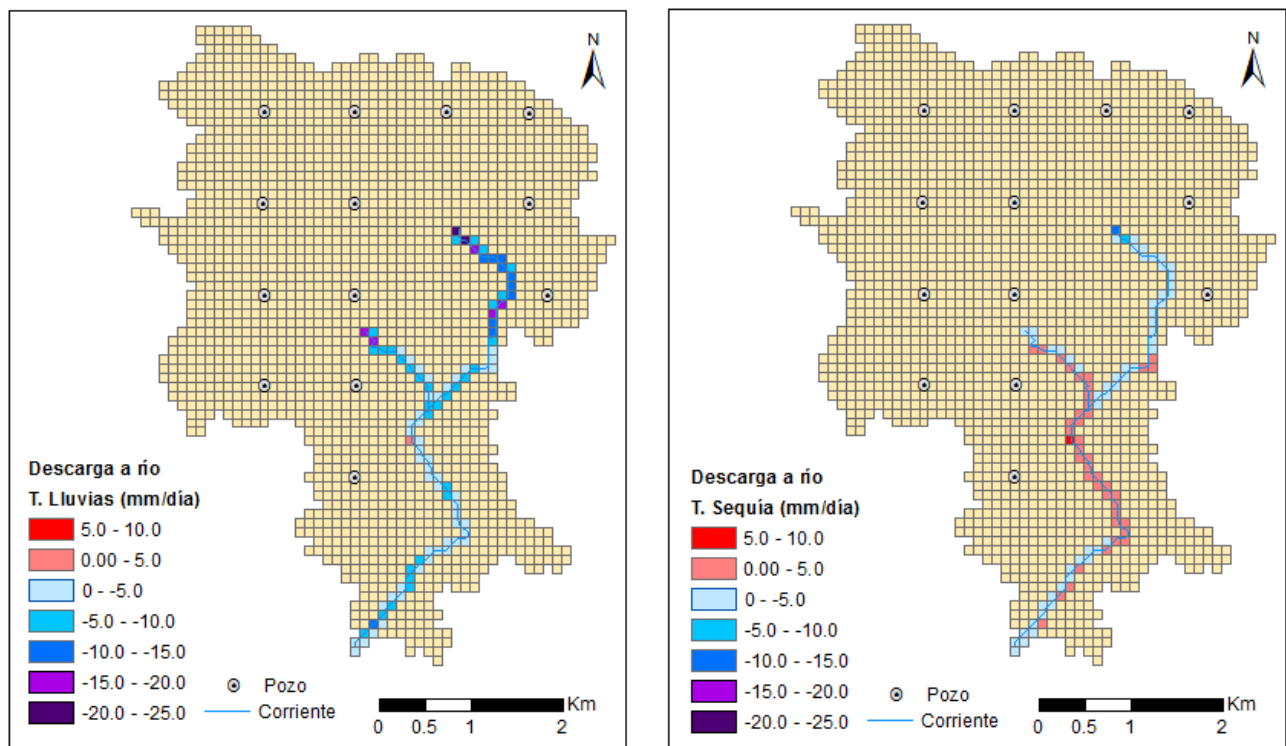


Figura 51. Interacción acuífero-río en el escenario 2.

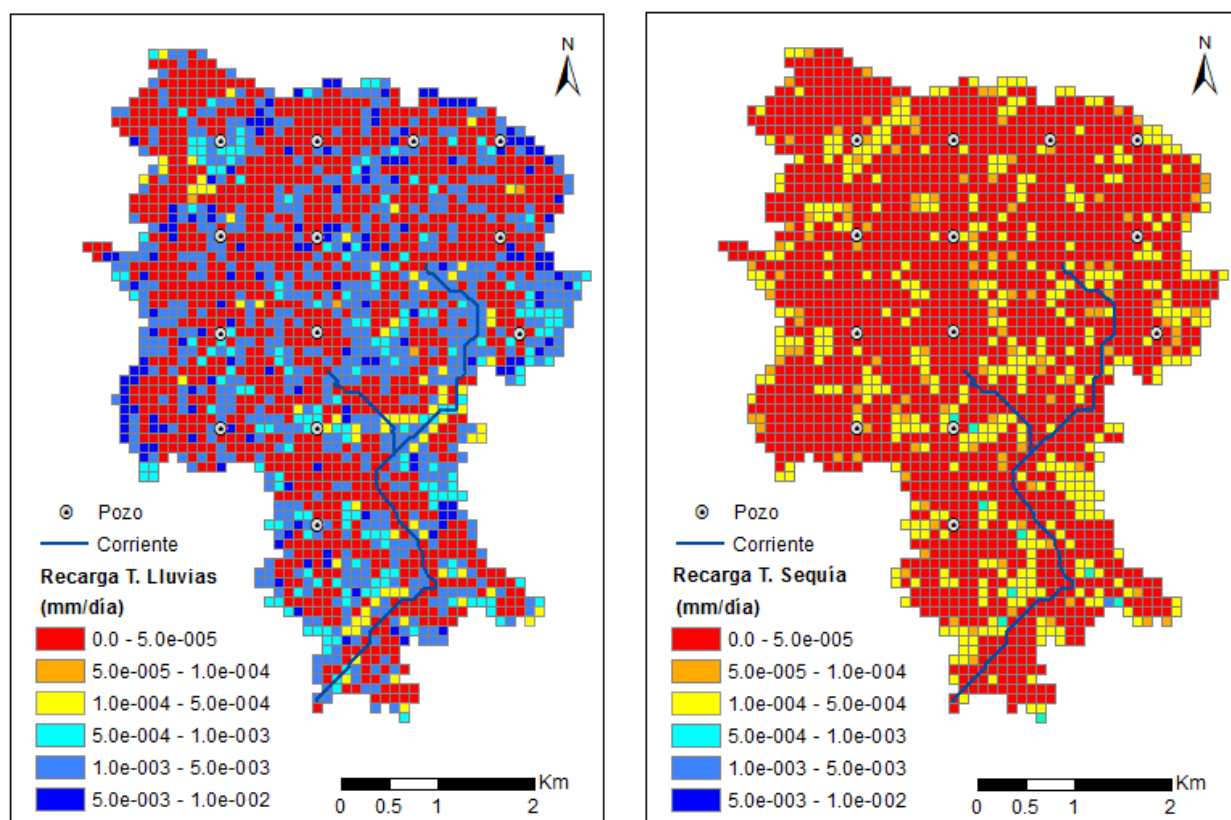


Figura 52. Recarga del acuífero en el escenario 2 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia

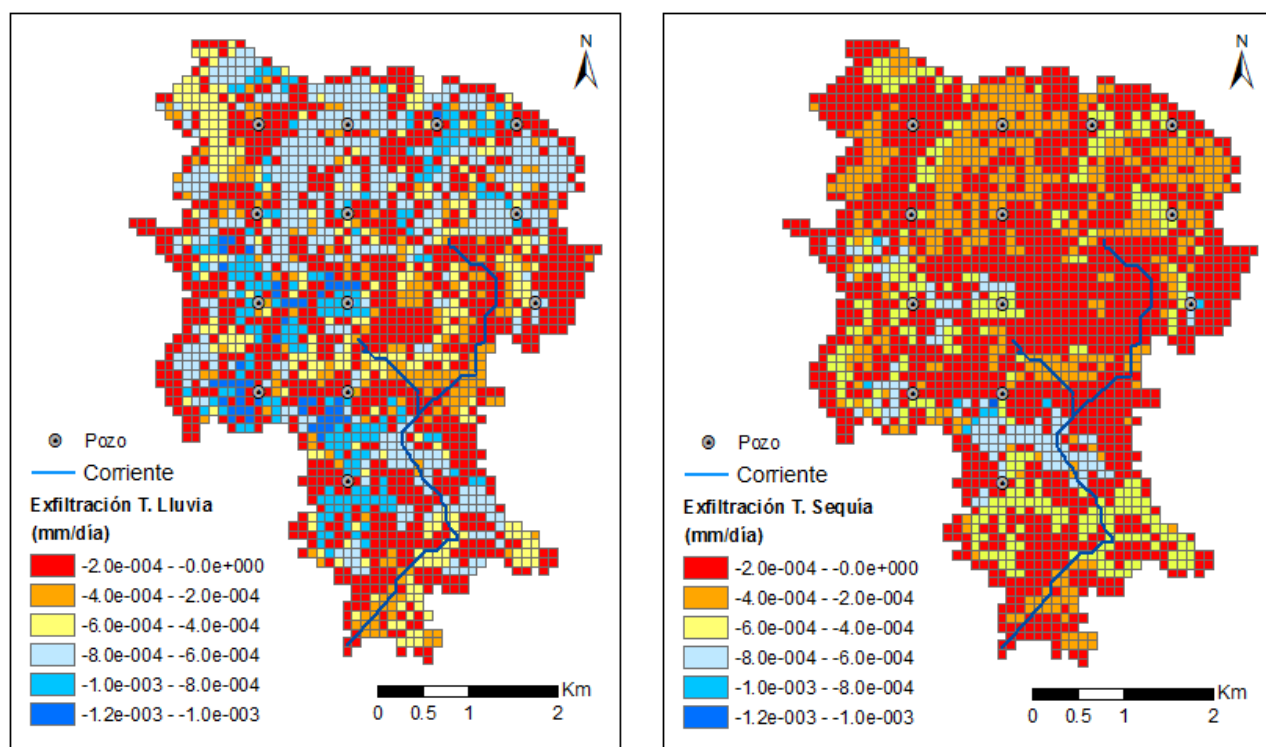
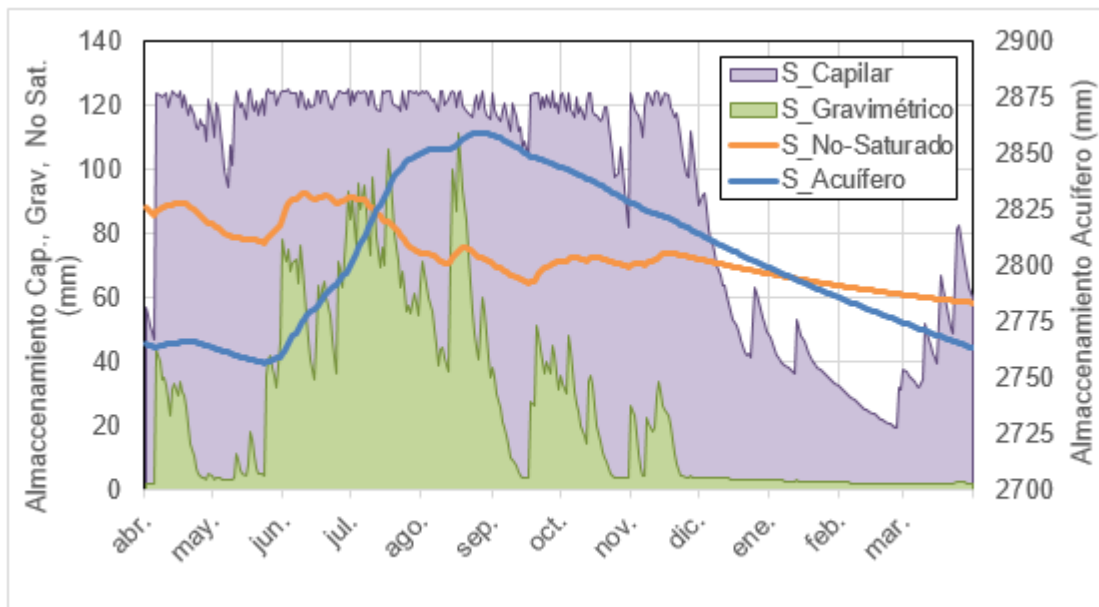


Figura 53. Exfiltración del acuífero en el escenario 2 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Balance hídrico

El balance realizado en la zona de estudio se muestra de forma mensual en la Tabla 7 y la Figura 55. El porcentaje infiltrado no varió significativamente respecto a la condición natural, generando un incremento del 0.37%, y disminuyendo en forma directamente proporcional la escorrentía superficial. La evapotranspiración se redujo al 48%, el flujo hipodérmico que trascurre hasta las corrientes bajo un 2.4%, mientras que el flujo que vuelve a salir a superficie o flujo de Dunne no tuvo cambios. El flujo que percola a través de la zona no saturada llega prácticamente a recargar el acuífero tuvo un incremento del 1.5% y se logró disminuir la exfiltración en un 2.3%.

Para analizar la variación en los almacenamientos de cada uno de los reservorios se presenta la Figura 54. El reservorio capilar no presenta cambios relevantes así como tampoco el reservorio gravimétrico. La zona no satura se mantiene constante. El mayor cambio se ve reflejado en el almacenamiento del acuífero, en el cual se hace notorio el efecto del bombeo a lo largo de todo el año, reduciendo su contenido especialmente en la temporada de sequía.



**Figura 54. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 2 en cada una de las zonas del modelo.**

De este escenario se concluye que aunque en efecto reduce el flujo de exfiltración a los niveles superficiales, disminuye significativamente el caudal de salida al río, evidenciando que en la temporada de sequía el flujo de la corriente puede llegar a ser mínimo y a afectar el ecosistema de la zona.

**Tabla 7. Balance mensual del escenario 2 para el periodo 2010-1011 (año húmedo). Todos los valores están en mm/mes.**

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Rio	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo démico	q_Acuifero- Rio	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSsup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
<b>Abr</b>	400.51	121.67	199.18	182.42	0.00	16.66	0.10	218.08	26.14	12.62	4.91	7.71	0.00	58.53	13.51	-1.84
<b>May</b>	333.81	133.25	99.10	80.76	0.00	18.56	-0.22	253.04	23.33	10.86	4.68	6.18	0.00	82.58	12.47	-3.05
<b>Jun</b>	373.81	106.82	196.35	100.27	1.15	91.47	3.47	273.54	80.33	60.66	7.79	52.87	0.00	1.57	19.67	39.95
<b>Jul</b>	482.91	111.82	345.00	203.69	1.15	132.61	7.54	279.22	65.38	82.86	15.92	66.94	0.00	-15.83	-17.48	49.95
<b>Ago</b>	353.11	138.74	242.60	134.56	0.85	99.71	7.48	218.55	36.71	45.32	19.63	25.69	0.00	-37.84	-8.60	8.75
<b>Sept</b>	201.90	143.79	67.21	37.44	0.00	24.53	5.25	164.47	14.96	17.38	17.07	0.31	0.00	-1.74	-2.42	-14.39
<b>Oct</b>	137.60	164.70	45.67	23.68	0.07	17.97	3.95	113.92	8.77	12.11	14.57	-2.45	0.00	-63.02	-3.35	-15.85
<b>Nov</b>	197.20	144.31	43.03	29.70	0.06	10.59	2.69	167.50	10.97	9.44	11.31	-1.87	0.00	12.89	1.53	-14.01
<b>Dic</b>	35.90	88.59	3.86	1.15	0.00	1.23	1.49	34.75	0.00	4.97	9.06	-4.09	0.00	-46.01	-4.97	-15.02
<b>Ene</b>	18.00	42.01	1.84	0.31	0.00	0.93	0.60	17.69	0.00	3.96	7.16	-3.19	0.00	-18.09	-3.96	-13.24
<b>Feb</b>	13.00	19.24	0.73	0.13	0.00	0.61	-0.01	12.87	0.00	2.92	5.34	-2.42	0.00	-1.63	-2.92	-11.87
<b>Mar</b>	99.00	71.90	2.60	2.41	0.00	0.67	-0.48	96.60	0.00	2.64	5.02	-2.37	0.00	29.04	-2.64	-11.34
<b>Total</b>	2646.75	1286.83	1247.18	796.52	3.28	415.54	31.85	1850.23	266.59	265.75	122.46	143.28	0.00	0.46	0.84	-1.96
<b>%</b>	100.00%	48.62%	47.12%	30.09%	0.12%	15.70%	1.20%	69.91%	10.07%	10.04%	4.63%	5.41%	0.00%	-	-	-
<b>Diferencia con escenario 1</b>	0.00%	-0.92%	-3.36%	-0.37%	0.00%	-2.56%	-0.43%	0.37%	1.49%	1.48%	-2.33%	5.44%	0.00%	-	-	-

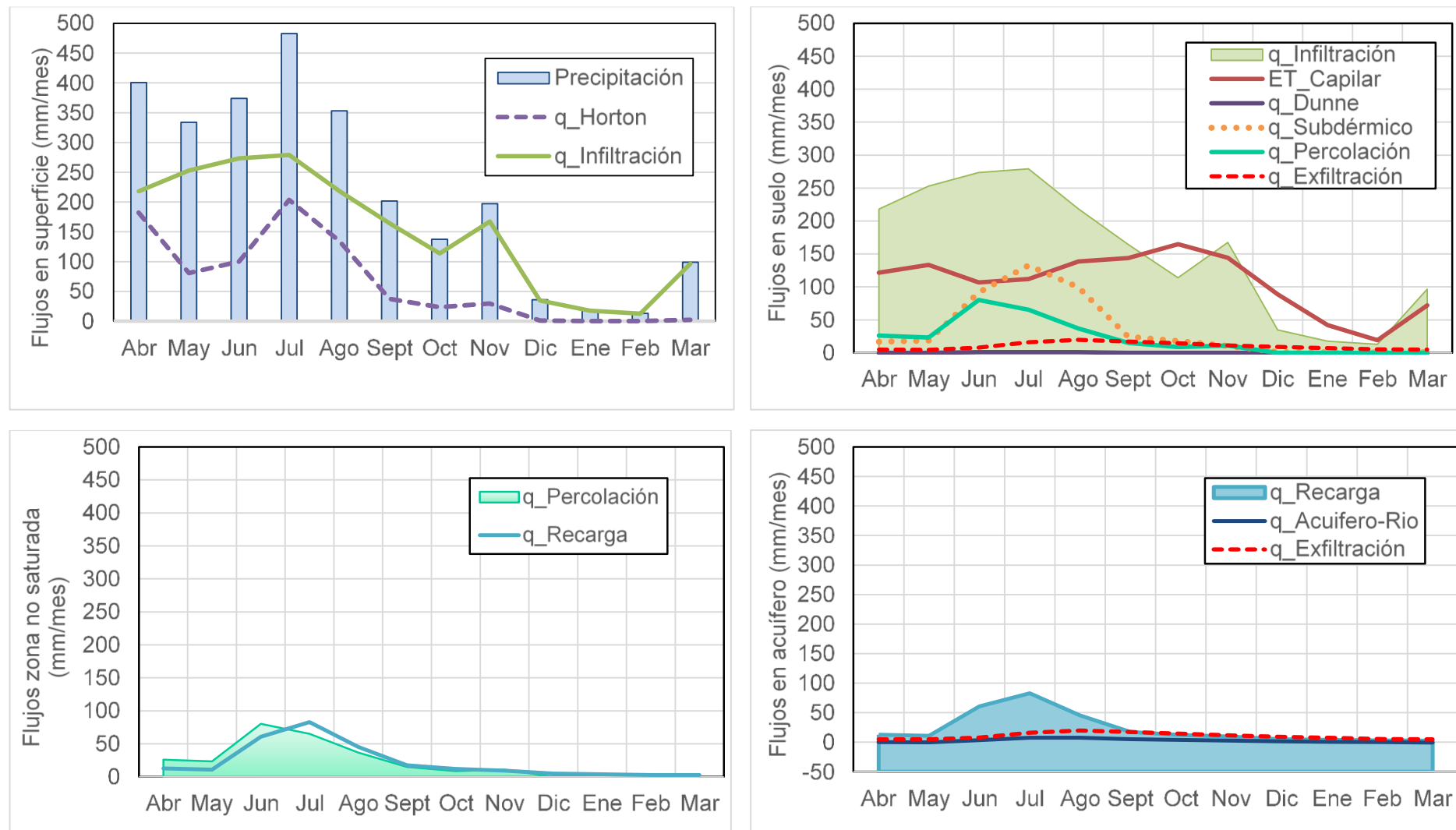


Figura 55. Balance mensual discriminando las zonas verticales para el escenario 2.



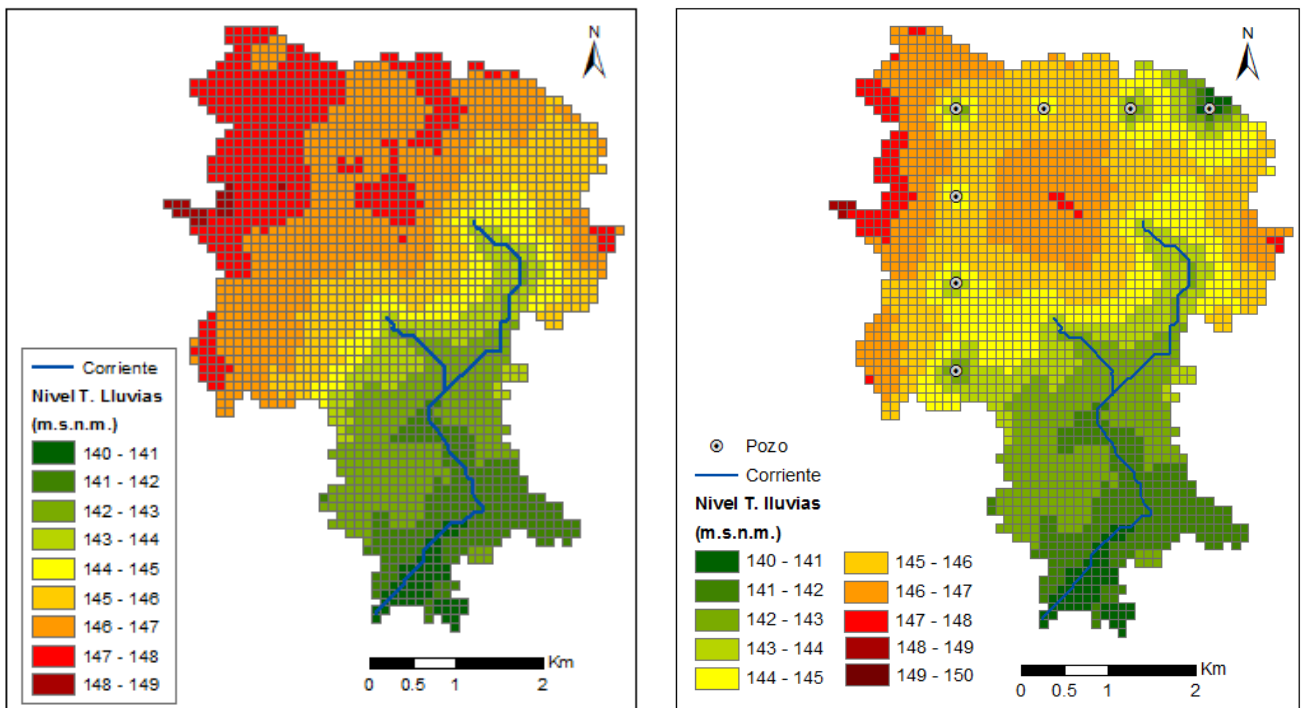
### 3.3 ESCENARIO 3: BOMBEO LEJOS DE LAS CORRIENTES PARA EL AÑO HÚMEDO

En este escenario se distribuyeron 7 pozos ubicados lejos de las corrientes definidas, implementando al igual que el escenario anterior un caudal de bombeo igual al 50% de la recarga natural que llega al acuífero.

Flujo recarga natural (q_Recarga)	227mm/año = 13250.6m <sup>3</sup> /día
Caudal de bombeo (50% de q_Recarga)	6625.3 m <sup>3</sup> /día
Caudal por pozo (7 pozos)	950 m <sup>3</sup> /día

#### 3.3.1 Comportamiento general

Con la implementación de los pozos en la periferia del modelo y con el aumento del caudal bombeado, se consigue reducir los niveles del agua respecto a la condición natural logrando un descenso más uniforme que el alcanzado en el escenario 2. Sin embargo, la influencia del bombeo no cubre la zona central, que registra un descenso bajo en los niveles (ver Figura 56).



**Figura 56. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 3 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia**

Para la temporada de sequía mostrada en la Figura 57 se puede observar que los niveles de los ríos permanecen constantes respecto a la condición natural, lo cual es muy importante ya que el efecto del bombeo no va a afectar de forma rigurosa la interacción del flujo del acuífero hacia la corriente.

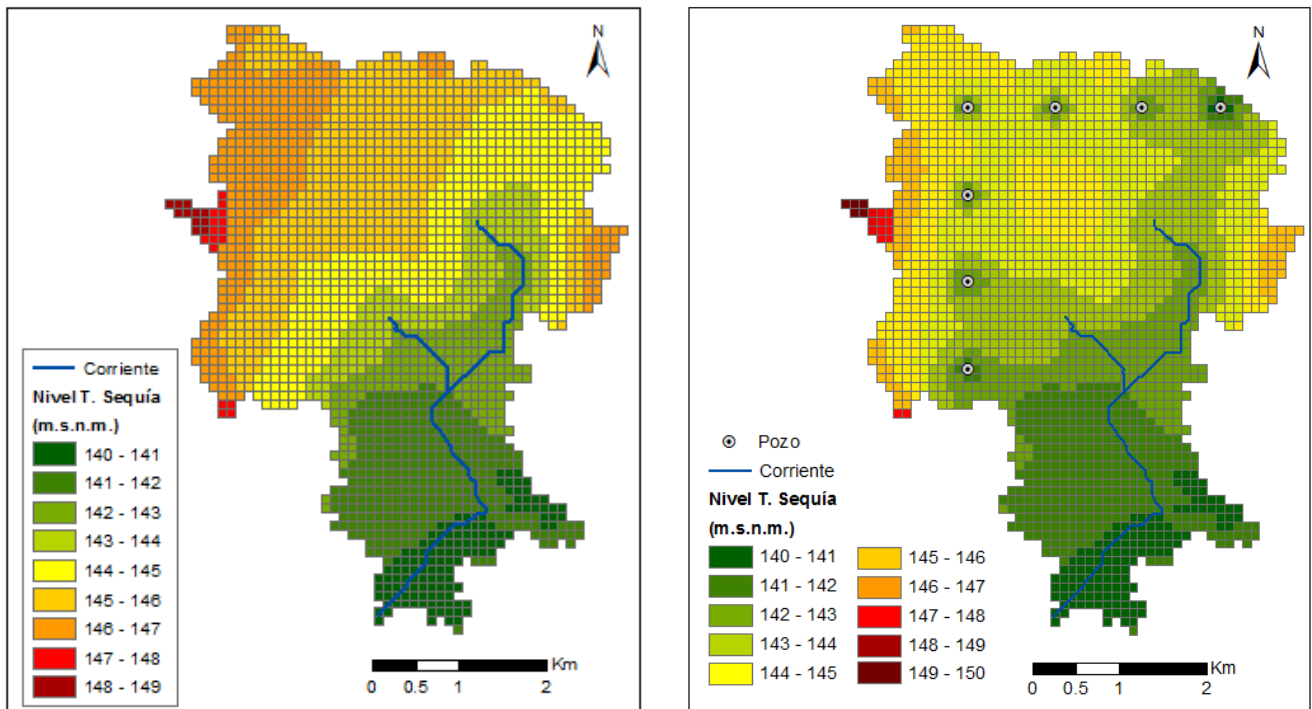


Figura 57. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 3 (a la derecha).

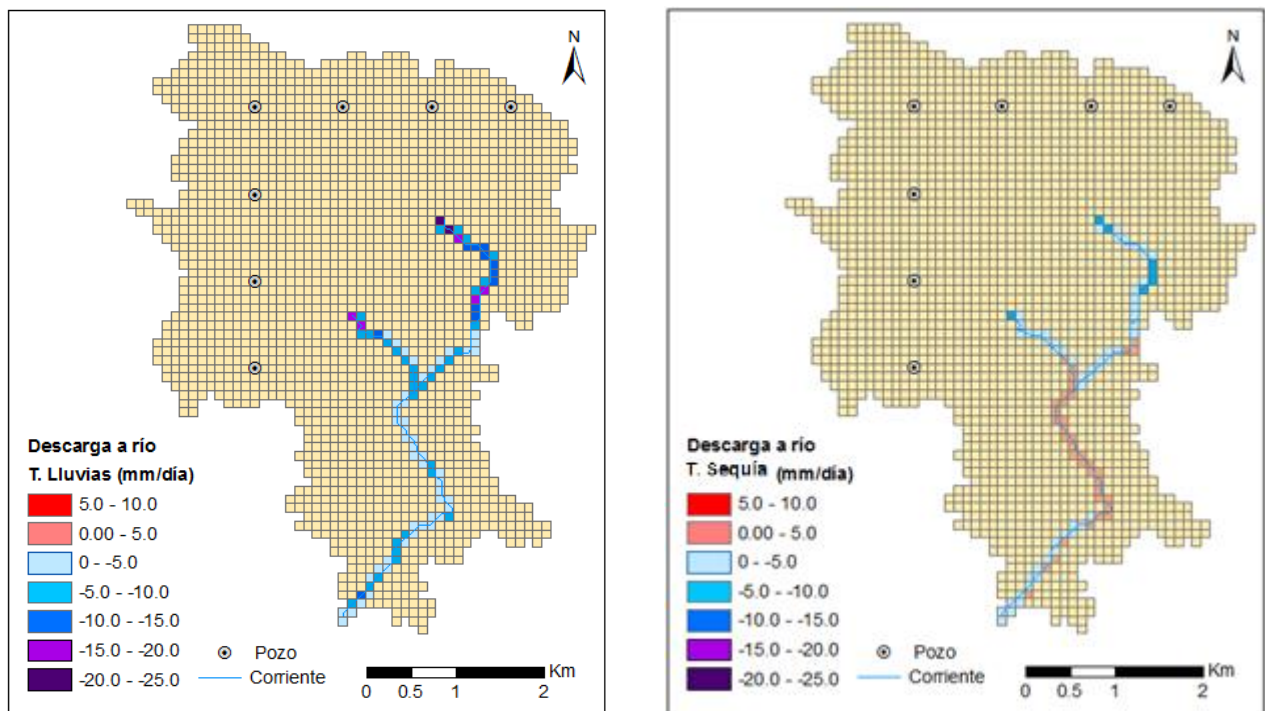
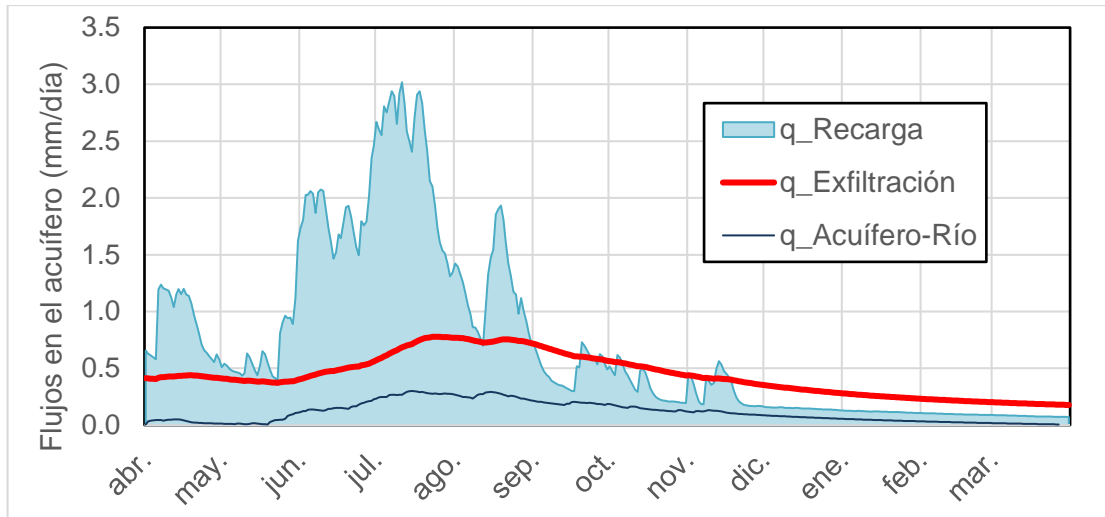


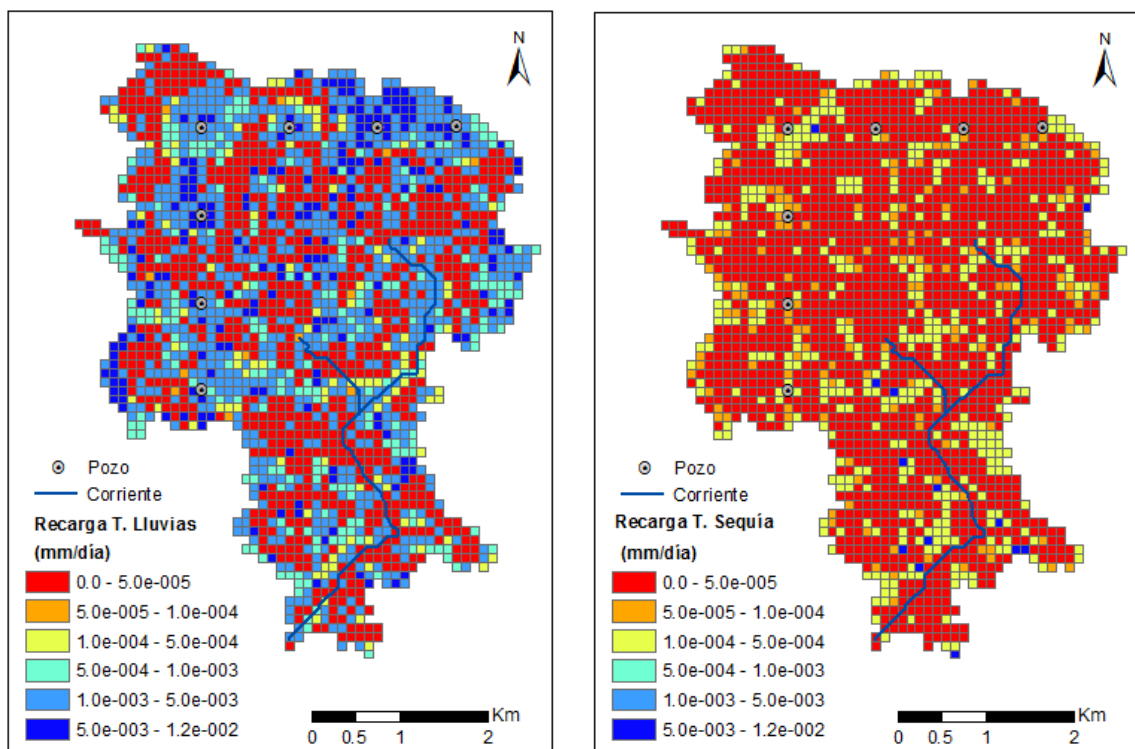
Figura 58. Interacción acuífero-río en el escenario 3.

La interacción acuífero-río, como se observa en la Figura 58, presenta un comportamiento similar al escenario 1 para ambas temporadas demostrando que el bombeo no llega a condicionar los flujos naturales de la zona. Si es cierto que se evidencia en la temporada de sequía más tramos de la corriente en condiciones de “río perdedor” pero realizando el balance son superiores los flujos que provienen del acuífero garantizando el caudal del río (Figura 59).



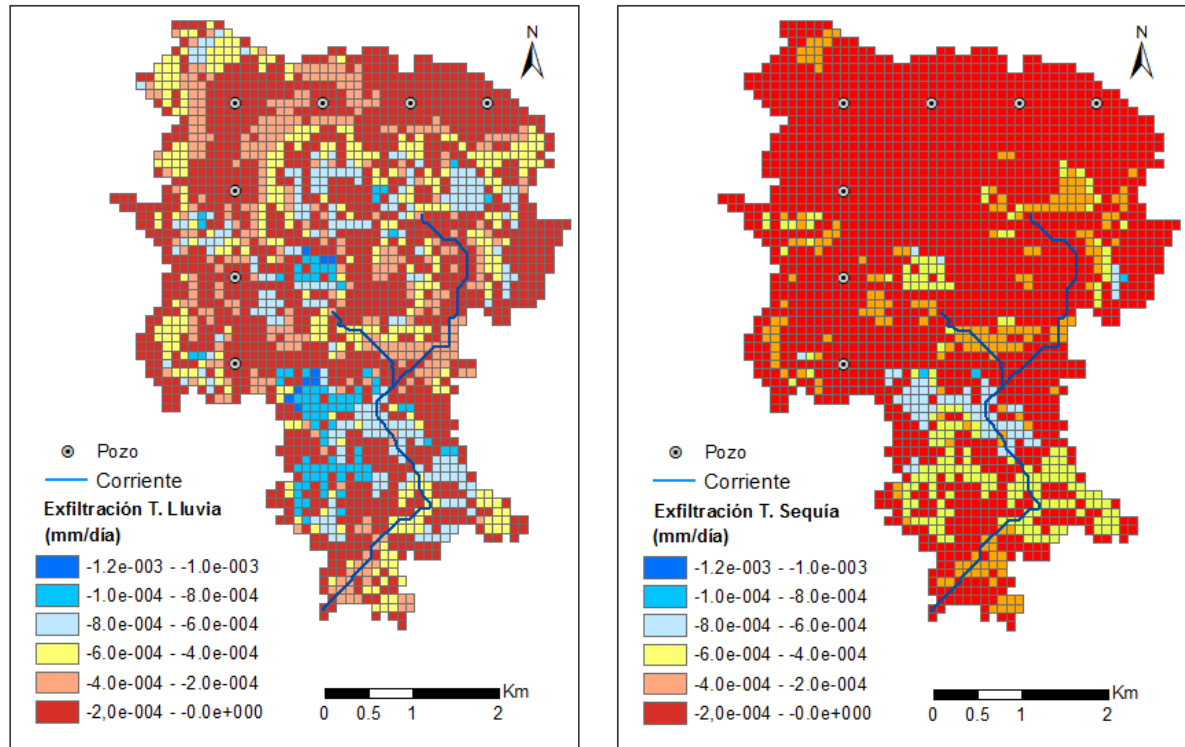
**Figura 59. Flujos en el acuífero para el escenario 3.**

Con el aumento en el caudal bombeado se aprecia una mayor recarga en las áreas de influencia de los pozos para ambas temporadas, como se muestra en la Figura 60. De este escenario se concluye que si el objetivo fuera incrementar la recarga, sería preferible tener mayores caudales de bombeo concentrados que pozos repartidos en el área.



**Figura 60. Recarga del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia**

La exfiltración sigue el mismo comportamiento que el escenario 2, no se observan diferencias relevantes (Figura 61).



**Figura 61. Exfiltración del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha). Fuente: Elaboración propia**

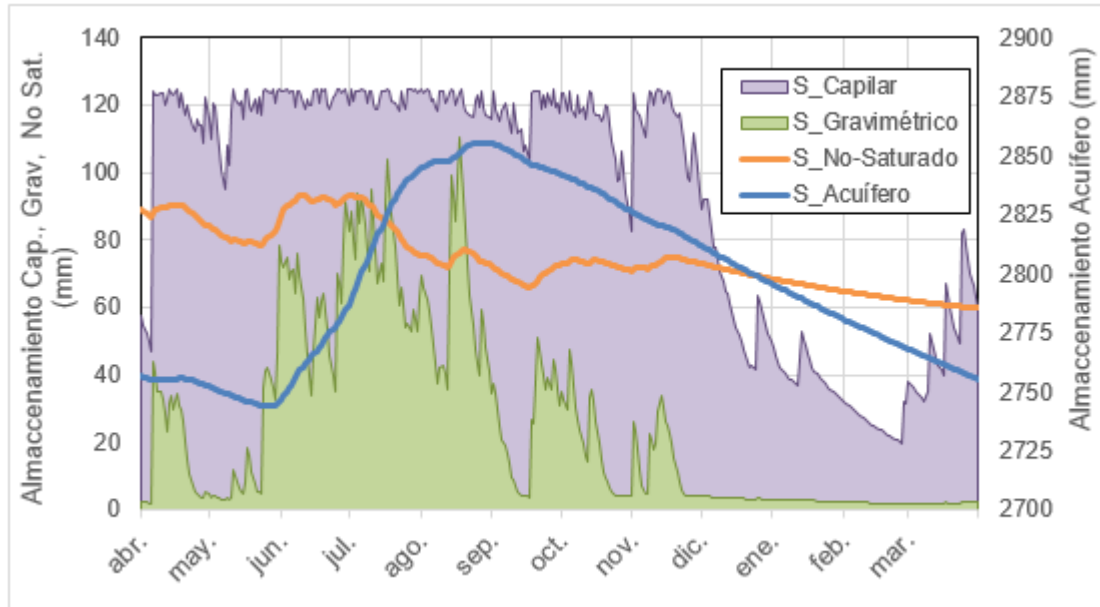
### 3.3.2 Balance hídrico

**El balance realizado en la zona de estudio se muestra de forma mensual en la**

Tabla 8 y en la Figura 63. Los flujos superficiales presentan poca variación, la infiltración tuvo un incremento del 0.36%, y disminuyendo en forma directamente proporcional la escorrentía superficial, valor que no difiere con el escenario 2 ya que el caudal bombeado es el mismo. La evapotranspiración se redujo al 48%, el flujo hipodérmico que trascurre hasta las corrientes bajo un 3.0%, mientras que el flujo que vuelve a salir a superficie o flujo de Dunne no tuvo cambios. La interacción acuífero-río sólo se redujo en un 0.08%, lo que quiere decir que el bombeo no produce un efecto adverso a este parámetro.

El flujo que percola a través de la zona no saturada llega prácticamente a recargar el acuífero tuvo un incremento del 1.9% y se logró disminuir la infiltración en un 2.3%, el mismo porcentaje resultante en el escenario 2.

Para analizar la variación en los almacenamientos de cada uno de los reservorios se presenta la Figura 62. El reservorio capilar no presenta cambios relevantes así como tampoco el reservorio gravimétrico. La zona no satura se mantiene constante. El almacenamiento del acuífero tiene el mismo comportamiento evidenciado en el escenario 2, consecuencia de extraer el mismo caudal.



**Figura 62. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 3 en cada una de las zonas del modelo.**

Este escenario incrementa la recarga sin afectar la descarga de flujo del acuífero a las corrientes superficiales. No obstante, aún queda un remanente de áreas propensas a las inundaciones, por lo que se puede probar a aumentar el caudal bombeado y analizar su impacto.

### 3.4 ESCENARIO 4: POZOS LEJOS DE LAS CORRIENTES Y CAUDAL BOMBEADO ALTO. AÑO HÚMEDO

En este escenario se distribuyeron 7 pozos ubicados lejos de las corrientes definidas, se incrementa el caudal de bombeo al 70% de la recarga natural que llega al acuífero.

Flujo recarga natural ( $q_{\text{Recarga}}$ )	227mm/año = 13250.6m <sup>3</sup> /día
Caudal de bombeo (70% de $q_{\text{Recarga}}$ )	9275 m <sup>3</sup> /día
Caudal por pozo (7 pozos)	1300 m <sup>3</sup> /día

#### 3.4.1 Comportamiento general

El aumento del caudal bombeado refleja un importante descenso en los niveles tanto en la temporada de lluvias como de sequía. En la Figura 64 se observa que el nivel se reduce llegando a igualar las elevaciones topográficas, indicando que la inundación pudo ser controlada especialmente al nor-oeste de la zona de estudio, como en el escenario anterior, sólo queda el sector central donde la red de pozos no tiene influencia significativa.

**Tabla 8. Balance mensual del escenario 3 para el periodo 2010-1011 (año húmedo). Todos los valores están en mm/mes.**

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Rio	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo démico	q_Acuifero Rio	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSsup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
<b>Abr</b>	400.51	121.77	200.49	182.66	0.00	16.93	0.91	217.85	26.14	10.89	5.49	5.40	0.00	58.50	15.25	-4.98
<b>May</b>	333.81	133.25	100.53	80.94	0.00	18.95	0.64	252.86	23.47	8.84	5.31	3.54	0.00	82.51	14.62	-6.58
<b>Jun</b>	373.81	106.82	195.56	100.27	1.15	89.93	4.21	273.54	84.04	62.66	7.69	54.97	0.00	-0.71	21.38	41.28
<b>Jul</b>	482.91	111.82	339.94	203.69	1.15	126.87	8.23	279.22	69.97	90.20	15.05	75.15	0.00	-15.53	-20.24	57.44
<b>Ago</b>	353.11	138.74	240.52	134.56	0.85	96.92	8.19	218.55	37.74	48.13	18.86	29.27	0.00	-36.84	-10.39	11.60
<b>Sept</b>	201.90	143.79	67.07	37.24	0.00	23.88	5.96	164.66	15.21	18.83	16.69	2.14	0.00	-1.53	-3.62	-13.29
<b>Oct</b>	137.60	163.81	45.90	23.66	0.07	17.47	4.69	113.94	9.15	12.69	14.40	-1.71	0.00	-62.17	-3.54	-15.87
<b>Nov</b>	197.20	144.31	43.87	29.80	0.06	10.58	3.43	167.40	11.44	10.08	11.33	-1.25	0.00	12.34	1.36	-14.16
<b>Dic</b>	35.90	88.44	4.67	1.15	0.00	1.23	2.30	34.75	0.00	4.92	9.35	-4.43	0.00	-45.57	-4.92	-16.21
<b>Ene</b>	18.00	42.47	2.68	0.31	0.00	0.93	1.43	17.69	0.00	3.82	7.64	-3.81	0.00	-18.07	-3.82	-14.73
<b>Feb</b>	13.00	19.54	1.50	0.13	0.00	0.61	0.76	12.87	0.00	2.80	5.90	-3.09	0.00	-1.39	-2.80	-13.33
<b>Mar</b>	99.00	73.17	3.48	2.43	0.00	0.67	0.38	96.57	0.00	2.51	5.72	-3.21	0.00	28.45	-2.51	-13.07
<b>Total</b>	2646.75	1287.93	1246.20	796.84	3.28	404.97	41.10	1849.90	277.14	276.38	123.42	152.96	0.00	0.00	0.77	-1.88
<b>%</b>	100.00%	48.66%	47.08%	30.11%	0.12%	15.30%	1.55%	69.89%	10.47%	10.44%	4.66%	5.78%	-	-	-	-
<b>Diferencia con escenario 1</b>	0.00%	-0.88%	-3.39%	-0.36%	0.00%	-2.96%	-0.08%	0.36%	1.89%	1.88%	-2.30%	5.81%	-	-	-	-



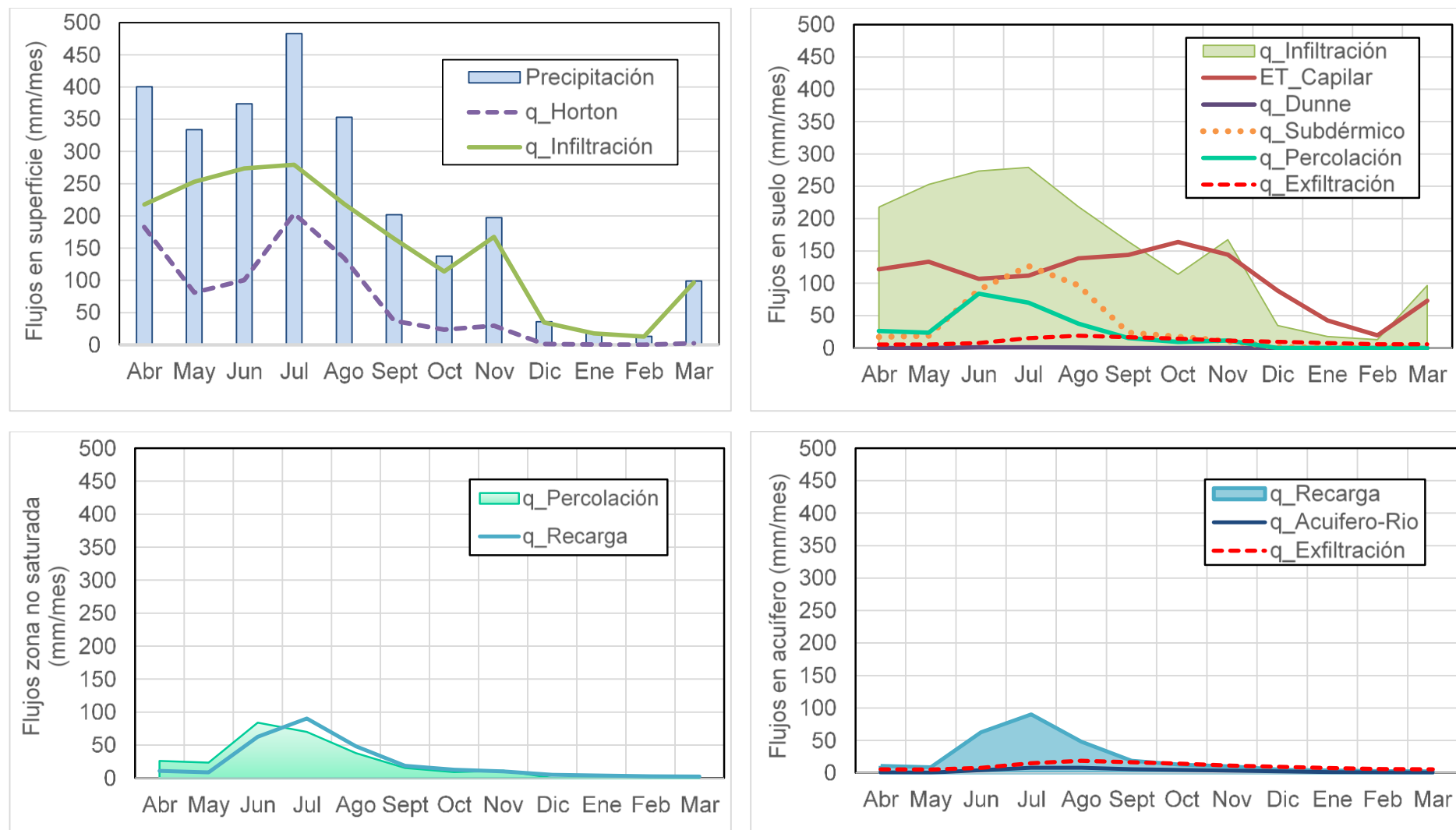


Figura 63. Balance mensual discriminando las zonas verticales del escenario 3.

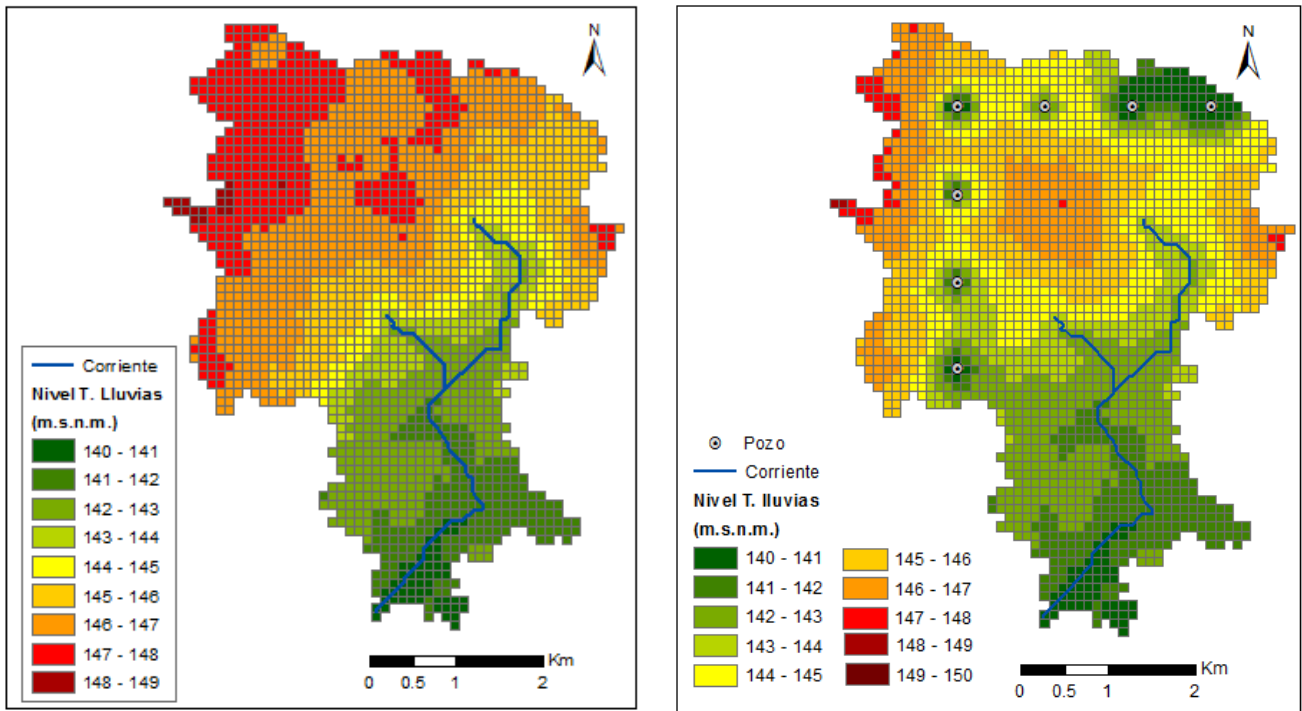


Figura 64. Comparación del nivel del agua durante la temporada de lluvias escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 4 (a la derecha).

Para la temporada de sequía los niveles alcanzan descensos que alcanzan 3m por debajo del nivel natural como se observa en la Figura 65. Esta condición se debe considerar de forma prudente para no afectar la interacción del acuífero con la zona edáfica.

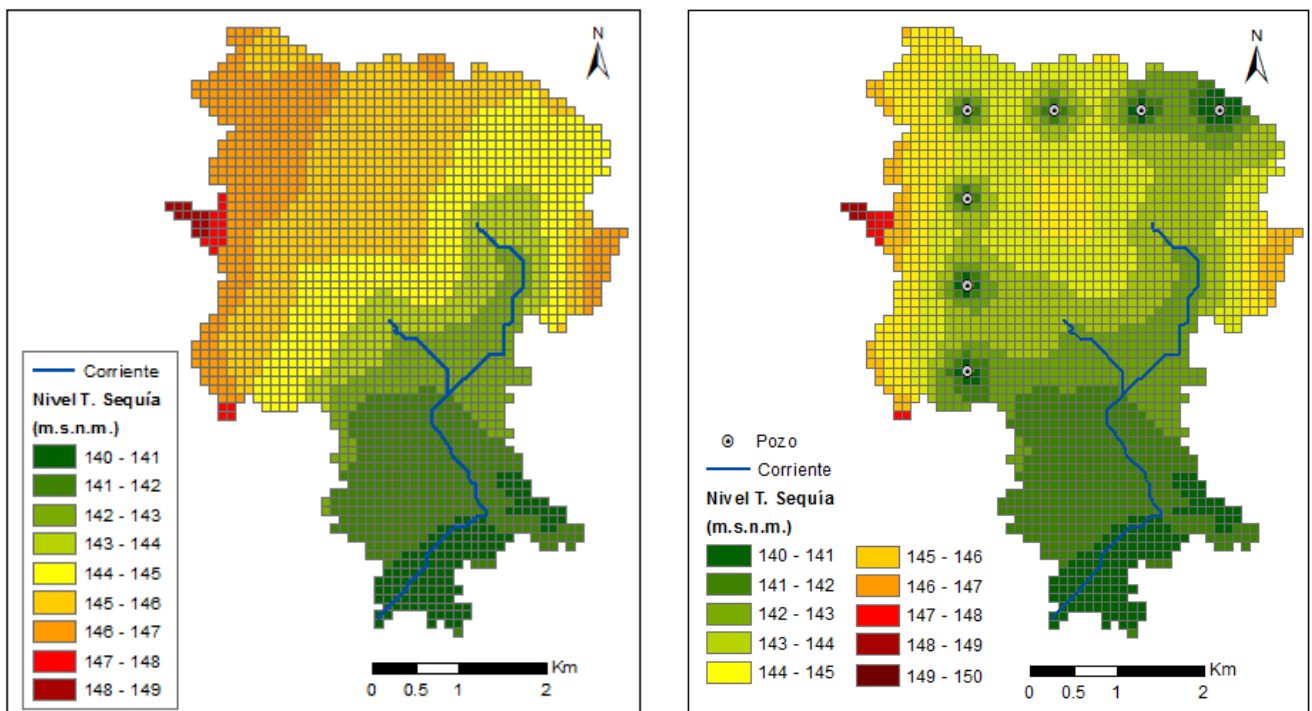


Figura 65. Comparación del nivel del agua durante la temporada de sequía escenario 1 (a la izquierda) con el escenario 4 (a la derecha). Fuente: Elaboración propia

La interacción acuífero-río mostrada en la Figura 66 tiene el mismo comportamiento del escenario 3, evidenciando que el aumento del bombeo no ha afectado el flujo.

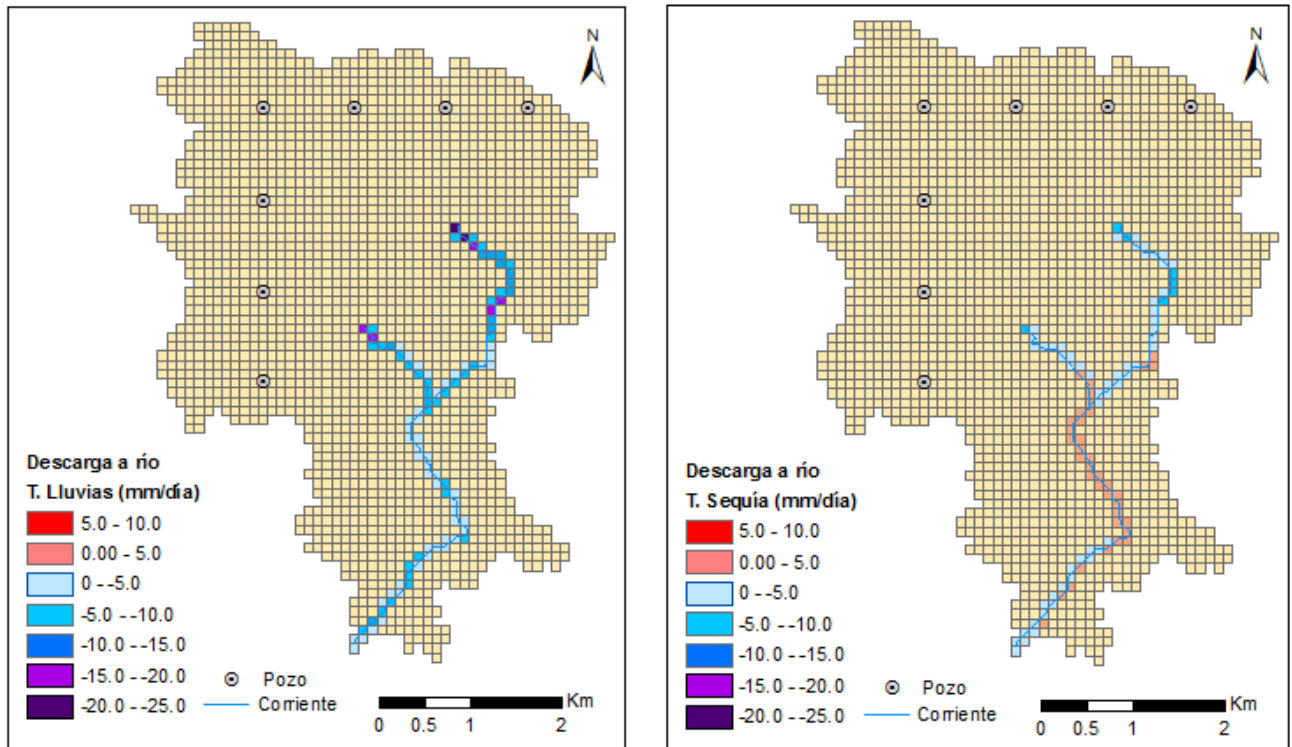


Figura 66. Interacción acuífero-río en el escenario 4. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 67 se observa un incremento en la recarga en toda la zona, siendo más significativa para la temporada de lluvias en el mes de julio y agosto. Con el aumento en el caudal bombeado se aprecia una mayor recarga en las áreas de influencia de los pozos para ambas temporadas, como se muestra en la Figura 68.

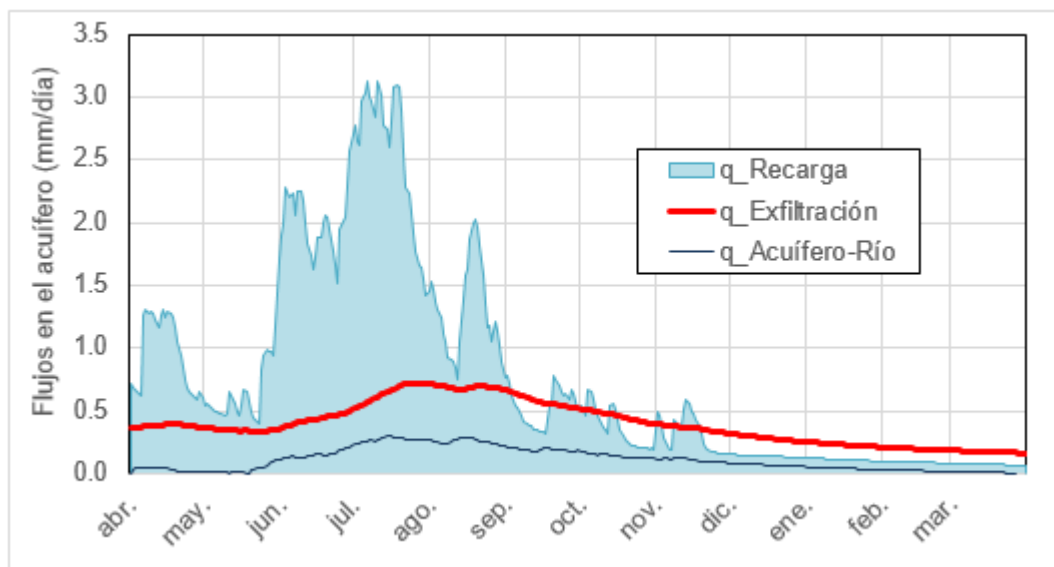


Figura 67. Flujos en el acuífero para el escenario 4.

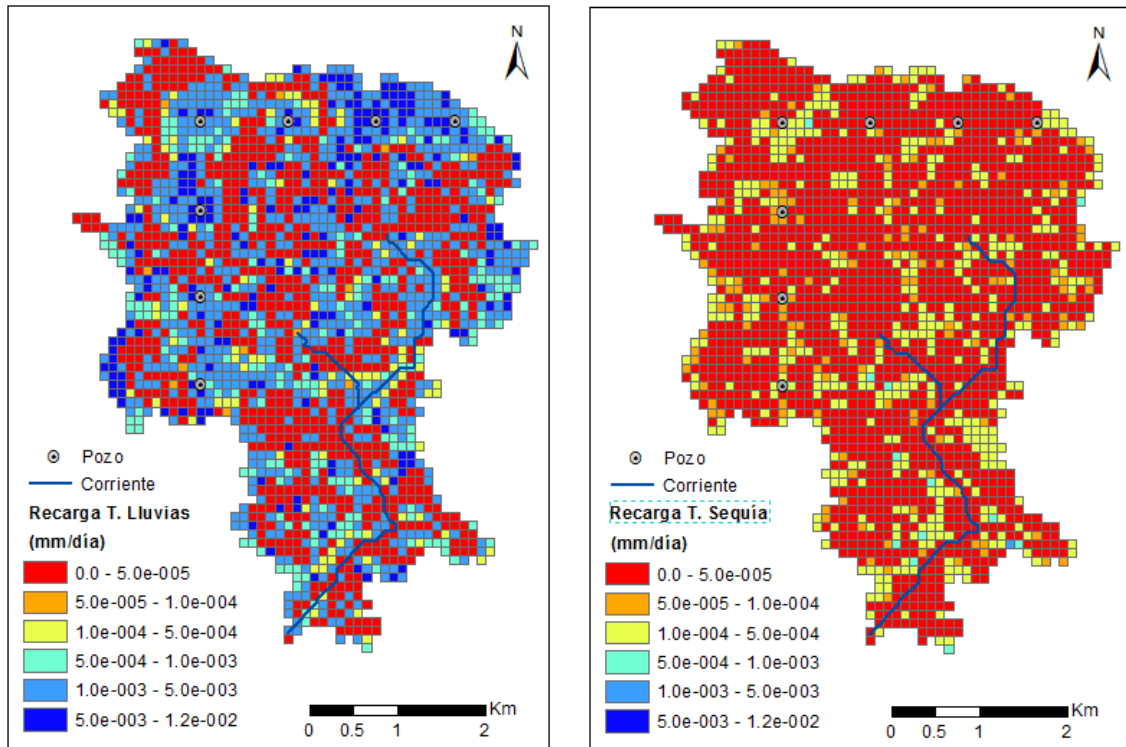


Figura 68. Recarga del acuífero en el escenario 3 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).

La exfiltración sigue el mismo comportamiento de los escenarios anteriores pero disminuyendo un 3% (Figura 69).

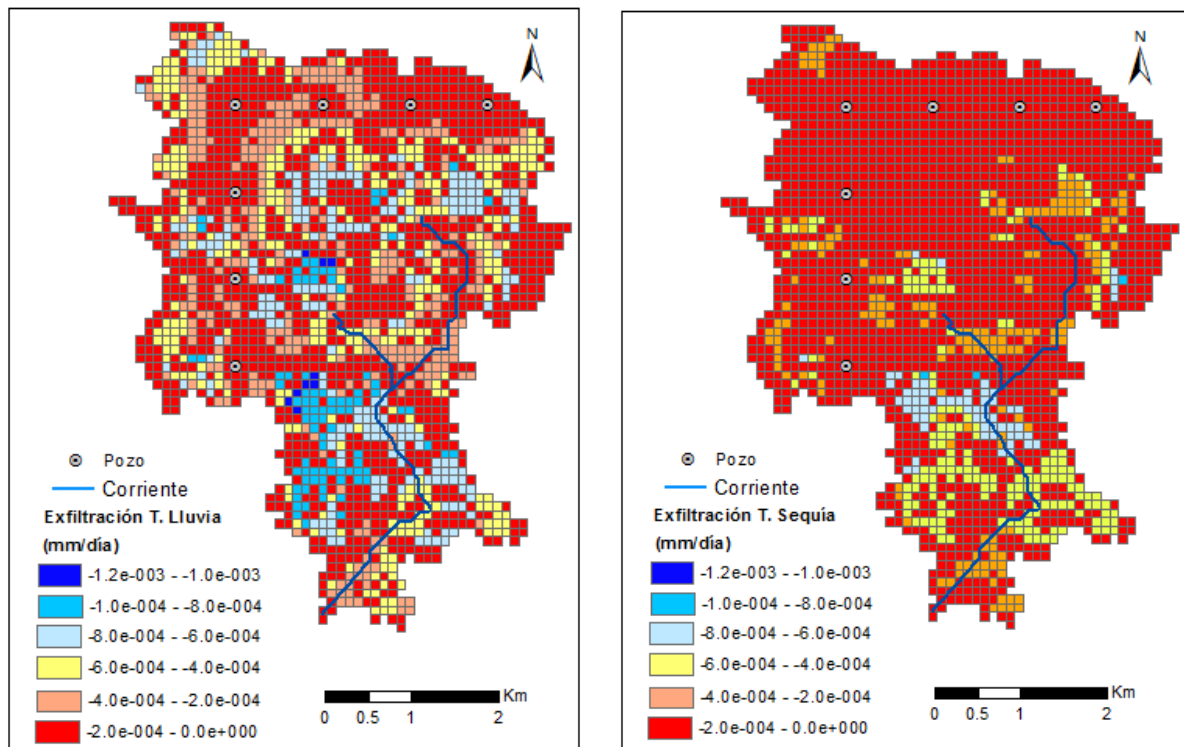


Figura 69. Exfiltración del acuífero en el escenario 4 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).

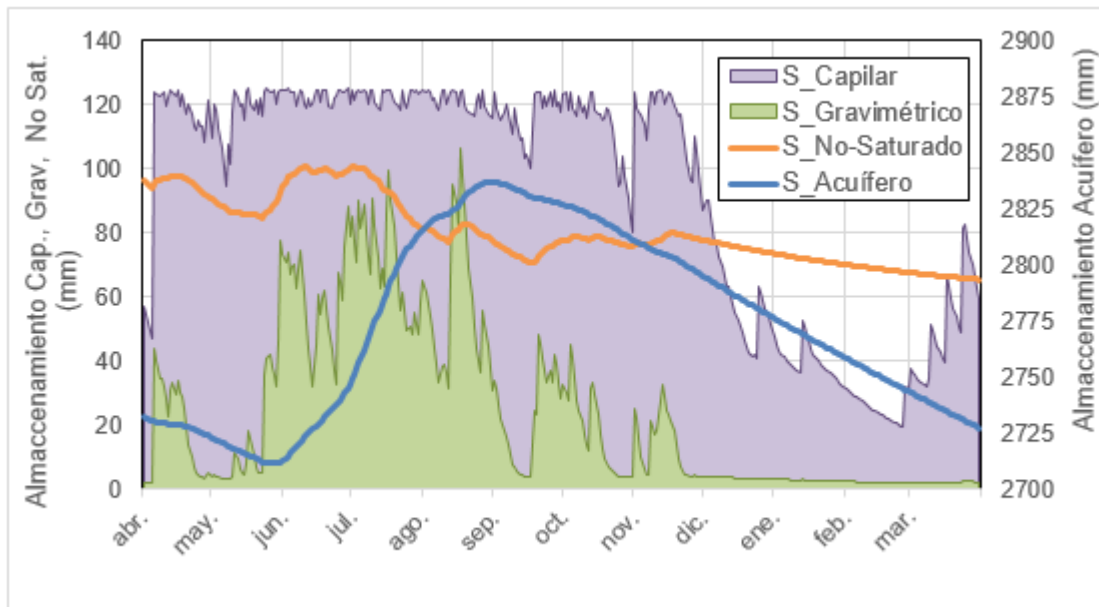
### 3.4.2 Balance hídrico

El balance realizado en la zona de estudio se muestra de forma mensual en la Tabla 9 y en la Figura 71. Los flujos superficiales presentaron variación por el aumento de bombeo, la infiltración tuvo un incremento del 0.5%, y disminuyendo en forma directamente proporcional la escorrentía superficial. La evapotranspiración se redujo al 48.5%, el flujo hipodérmico que trascurre hasta las corrientes bajo un 4.1%, mientras que el flujo que vuelve a salir a superficie o flujo de Dunne no tuvo cambios. La interacción acuífero-río sólo se redujo en un 0.1%, lo que comprueba que el bombeo sigue sin afectar el flujo.

El agua que percola a través de la zona no saturada llega prácticamente a recargar el acuífero tuvo un incremento del 2.7% y se disminuyó la exfiltración en un 2.9%.

Para analizar la variación en los almacenamientos de cada uno de los reservorios se presenta la Figura 70. El reservorio capilar no presenta cambios relevantes en su comportamiento así como tampoco el reservorio gravimétrico.

La zona no satura aumentó en 20mm su capacidad, lo cual es consecuencia del descenso del nivel freático. Por el contrario, el reservorio del acuífero disminuye considerablemente respecto a los anteriores escenarios.



**Figura 70. Variación temporal del almacenamiento para el escenario 4 en cada una de las zonas del modelo.**

Como conclusión de los resultados hallados para este escenario, se comprueba que el bombeo del 70% de la recarga natural conduce a reducir los niveles del acuífero y no contribuye a disminuir significativamente la escorrentía superficial. Se observó que para la temporada de sequía dichos niveles se reducen considerablemente.

**Tabla 9. Balance mensual del escenario 4 para el periodo 2010-1011. Todos los valores están en mm/mes.**

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Rio	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo dérmico	q_Acuifero- Rio	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSsup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
<b>Abr</b>	400.51	121.71	199.87	182.46	0.00	16.55	0.86	218.04	26.75	9.15	5.00	4.14	0.00	58.03	17.61	-9.68
<b>May</b>	333.81	133.25	99.66	80.51	0.00	18.58	0.57	253.29	23.76	7.20	4.83	2.37	0.00	82.53	16.56	-11.17
<b>Jun</b>	373.81	106.82	191.25	100.27	1.15	85.70	4.13	273.54	89.72	58.39	6.52	51.87	0.00	-3.33	31.33	34.78
<b>Jul</b>	482.91	111.82	328.91	203.69	1.15	115.93	8.15	279.22	79.57	101.85	12.39	89.46	0.00	-16.85	-22.29	68.35
<b>Ago</b>	353.11	138.74	231.62	134.56	0.85	88.09	8.12	218.55	42.58	59.67	16.03	43.64	0.00	-35.68	-17.09	22.55
<b>Sept</b>	201.90	143.79	63.14	36.11	0.00	21.15	5.87	165.80	15.96	23.50	14.49	9.01	0.00	-0.61	-7.54	-9.83
<b>Oct</b>	137.60	163.18	43.60	23.47	0.08	15.45	4.59	114.14	9.89	14.38	12.63	1.75	0.00	-61.84	-4.49	-15.82
<b>Nov</b>	197.20	144.31	41.77	28.73	0.07	9.64	3.32	168.47	11.73	10.36	9.96	0.40	0.00	12.68	1.37	-15.90
<b>Dic</b>	35.90	86.16	4.56	1.11	0.00	1.23	2.22	34.79	0.00	4.75	8.27	-3.52	0.00	-44.33	-4.75	-18.71
<b>Ene</b>	18.00	41.43	2.61	0.31	0.00	0.93	1.37	17.69	0.00	3.66	6.82	-3.16	0.00	-17.85	-3.66	-17.50
<b>Feb</b>	13.00	19.12	1.44	0.13	0.00	0.61	0.70	12.87	0.00	2.60	5.31	-2.71	0.00	-1.55	-2.60	-16.37
<b>Mar</b>	99.00	72.31	3.37	2.40	0.00	0.67	0.31	96.61	0.00	2.32	5.20	-2.88	0.00	28.82	-2.32	-16.15
<b>Total</b>	2646.75	1282.64	1211.80	793.75	3.30	374.55	40.20	1853.00	299.97	297.84	107.46	190.38	0.00	0.00	2.13	-5.46
<b>%</b>	100.00%	48.46%	45.78%	29.99%	0.12%	14.15%	1.52%	70.01%	11.33%	11.25%	4.06%	7.19%	-	-	-	-
<b>Diferencia con escenario 1</b>	0.00%	-1.07%	-4.69%	-0.47%	0.00%	-4.11%	-0.11%	0.47%	2.76%	2.69%	-2.90%	7.22%	-	-	-	-



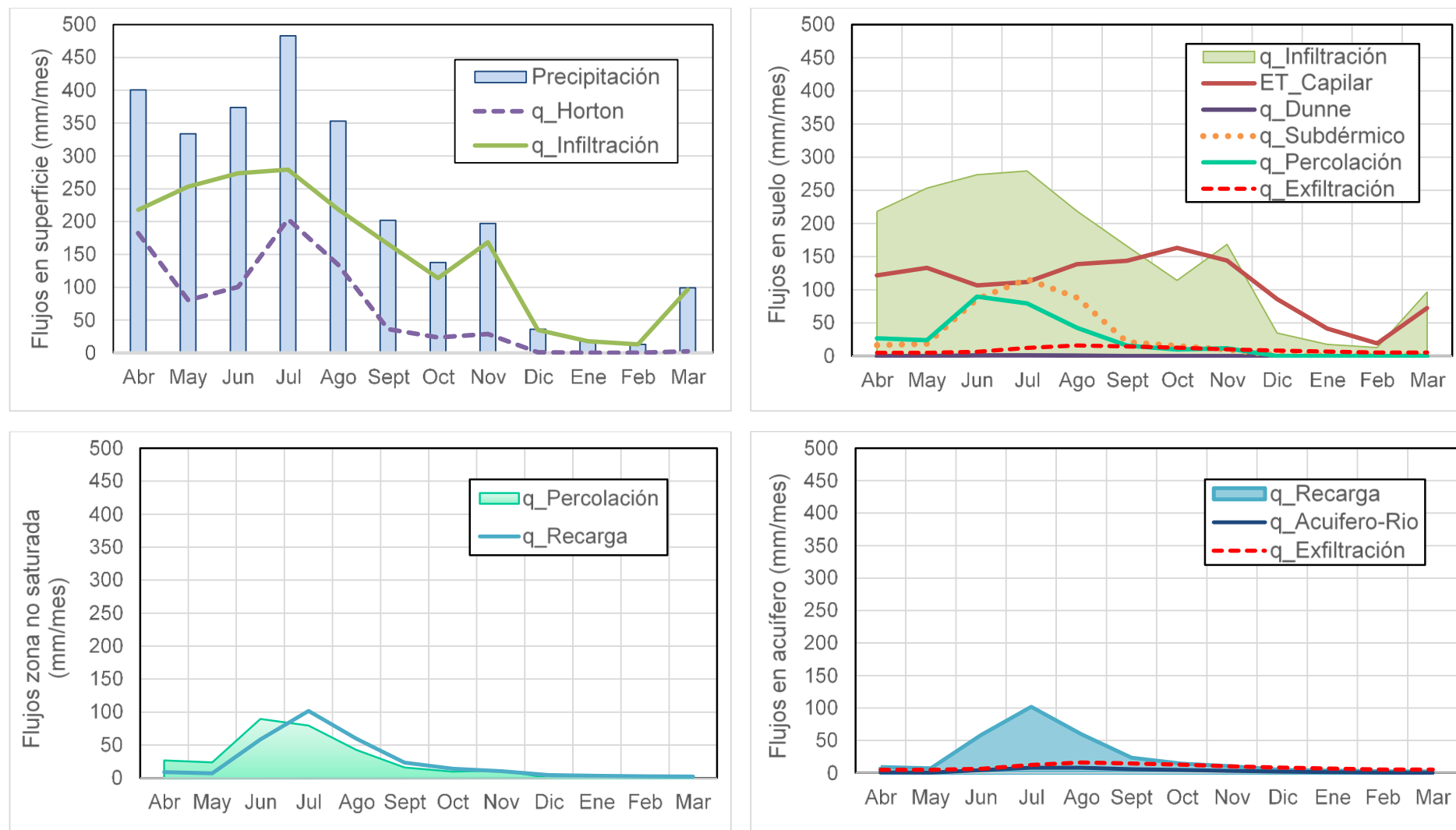


Figura 71. Balance mensual discriminando las zonas verticales para el escenario 4.

### 3.5 ESCENARIO 5: CONDICIÓN NATURAL AÑO SECO

En contra parte a los escenarios modelados anteriormente, también se quiere analizar las condiciones naturales de los Llanos Orientales durante un año caracterizado por bajas precipitaciones y posteriormente ver las implicaciones con la acción del bombeo. Para este análisis se toma el año 2013-2014.

La Figura 72 muestra los flujos superficiales durante el año seco. Se observa que la precipitación al ser baja es infiltrada en su mayoría, sólo el 20% se convierte en escorrentía. La evapotranspiración equivale a la potencial durante los meses de lluvias y disminuye conforme el reservorio capilar se desocupa.

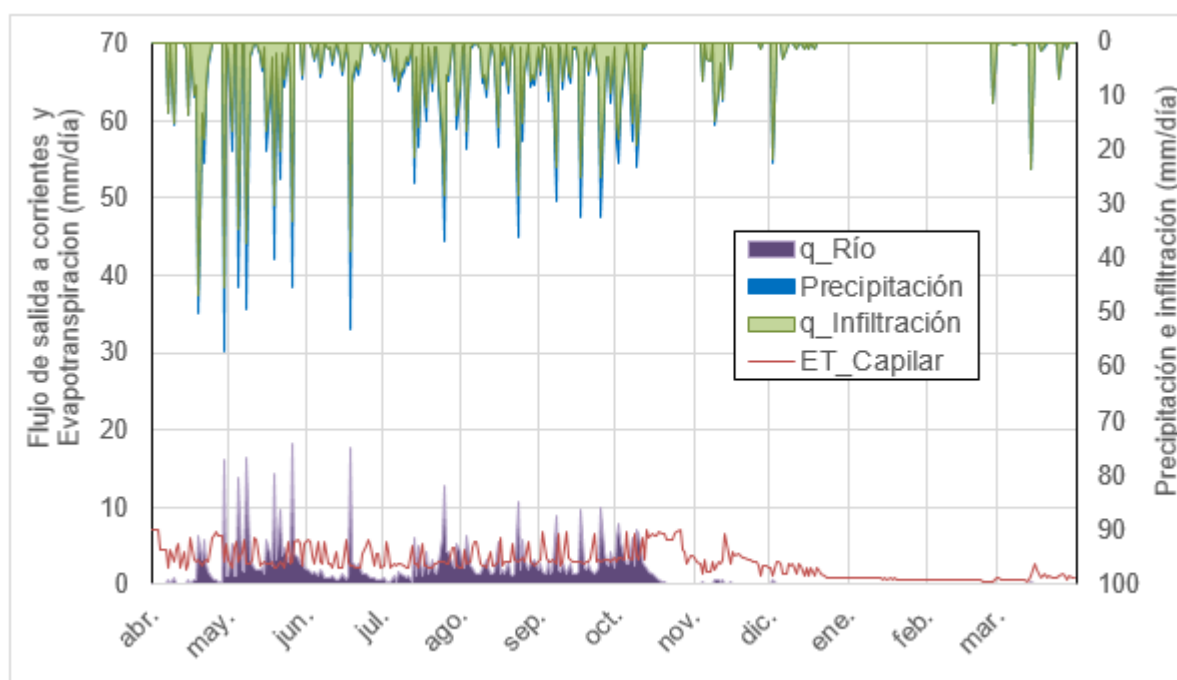


Figura 72. Flujos de la zona superficial para el periodo 2013-2014 (año seco).

De acuerdo a la Tabla 10 y Figura 73, los flujos en el suelo se reducen por las bajas lluvias, el flujo hipodérmico sólo alcanza un 15% de la precipitación y el dunniano es prácticamente nulo. La percolación corresponde a un 10% respecto a la precipitación, sin embargo, la recarga neta sólo representa un 1%. La exfiltración tiene un comportamiento constante a lo largo de todo el año (ver Figura 75). La interacción río-acuífero también es muy baja, presentando diferencias mínimas entre la temporada de lluvias y de sequía (ver Figura 76).

**Tabla 10. Balance hídrico para el escenario 5. Año húmedo.**

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Río	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo- dérmico	q_Acuifero- Río	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSsup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
<b>Abr</b>	217.40	84.97	30.40	25.60	0.00	4.66	0.14	191.81	6.37	3.37	8.06	-4.69	0.00	103.87	3.00	-4.83
<b>May</b>	297.51	113.96	125.73	65.77	0.00	58.06	1.91	231.74	50.35	23.68	9.71	13.96	0.00	19.08	26.68	12.05
<b>Jun</b>	111.30	106.33	42.93	23.21	0.00	17.86	1.86	88.09	11.32	15.07	10.88	4.19	0.00	-36.53	-3.75	2.33
<b>Jul</b>	227.10	93.21	71.31	40.78	0.00	28.58	1.95	186.33	25.78	16.95	11.19	5.76	0.00	49.95	8.82	3.81
<b>Ago</b>	173.30	105.24	74.27	30.99	0.00	40.32	2.95	142.31	22.04	23.28	12.91	10.37	0.00	-12.38	-1.23	7.41
<b>Sept</b>	196.80	107.38	81.13	36.53	0.00	41.66	2.94	160.28	20.53	20.60	13.28	7.32	0.00	3.98	-0.07	4.38
<b>Oct</b>	118.00	157.50	62.61	20.97	0.06	38.04	3.54	97.03	18.53	25.57	15.15	10.42	0.00	-101.95	-7.04	6.88
<b>Nov</b>	57.80	87.85	5.61	2.18	0.00	1.15	2.28	55.62	0.00	10.19	13.81	-3.62	0.00	-19.57	-10.19	-5.90
<b>Dic</b>	30.00	50.53	3.16	0.64	0.00	0.94	1.58	29.37	0.00	5.87	12.62	-6.75	0.00	-9.49	-5.87	-8.34
<b>Ene</b>	0.00	23.73	1.64	0.00	0.00	0.66	0.98	0.00	0.00	3.84	11.05	-7.21	0.00	-13.34	-3.84	-8.18
<b>Feb</b>	11.30	15.66	1.01	0.10	0.00	0.43	0.48	11.20	0.00	2.61	8.81	-6.20	0.00	3.92	-2.61	-6.68
<b>Mar</b>	34.10	29.43	1.06	0.46	0.00	0.43	0.18	33.64	0.00	2.32	8.71	-6.39	0.00	12.50	-2.32	-6.56
<b>Total</b>	1474.63	975.80	500.85	247.21	0.06	232.78	20.80	1227.42	154.92	153.34	136.18	17.16	0.00	0.04	1.58	-3.64
<b>%</b>	100.00%	66.17%	33.96%	16.76%	0.00%	15.79%	1.41%	83.24%	10.51%	10.40%	9.23%	1.16%	-	-	-	-

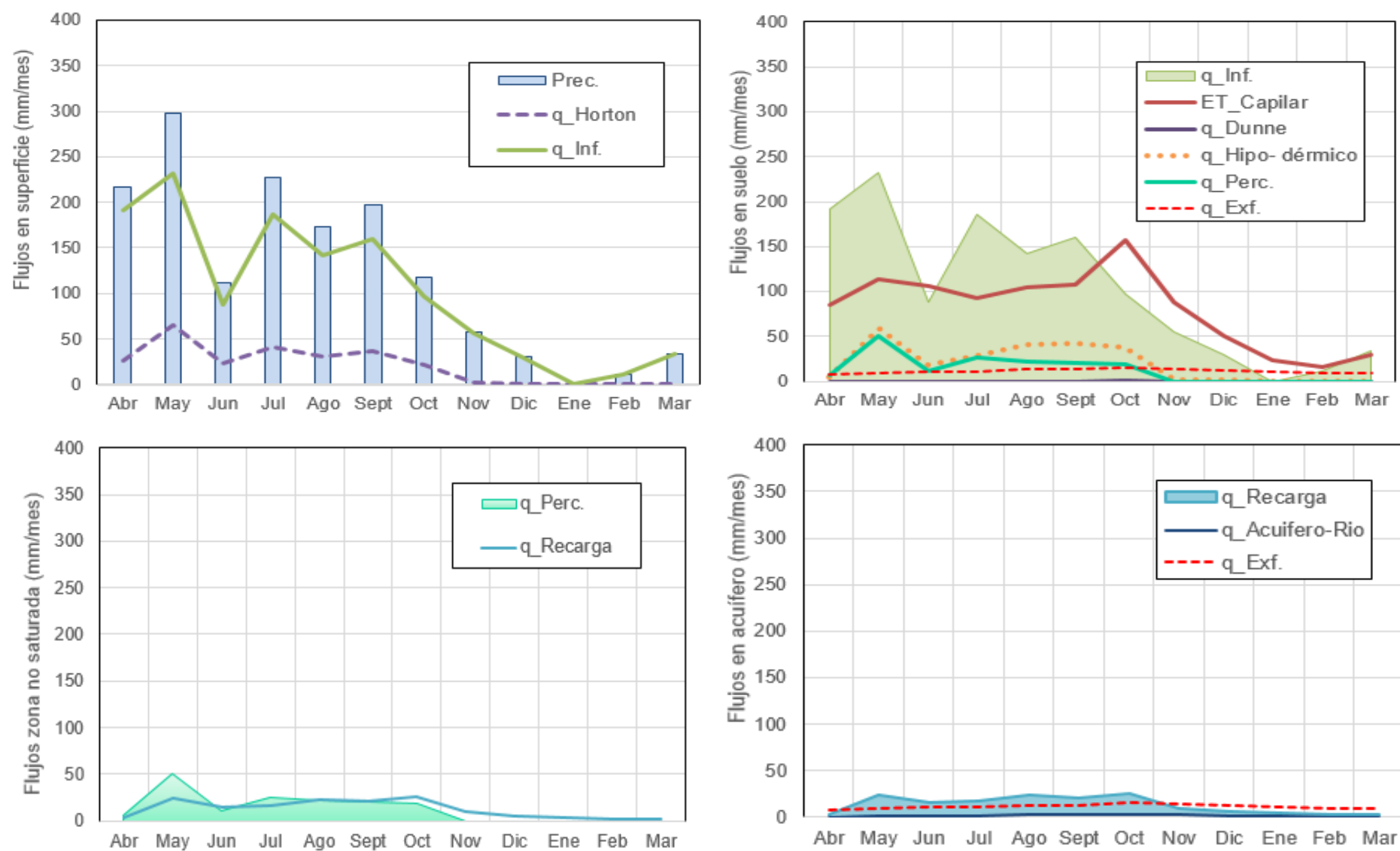


Figura 73. Flujos en cada reservorio para escenario 5. Año seco.

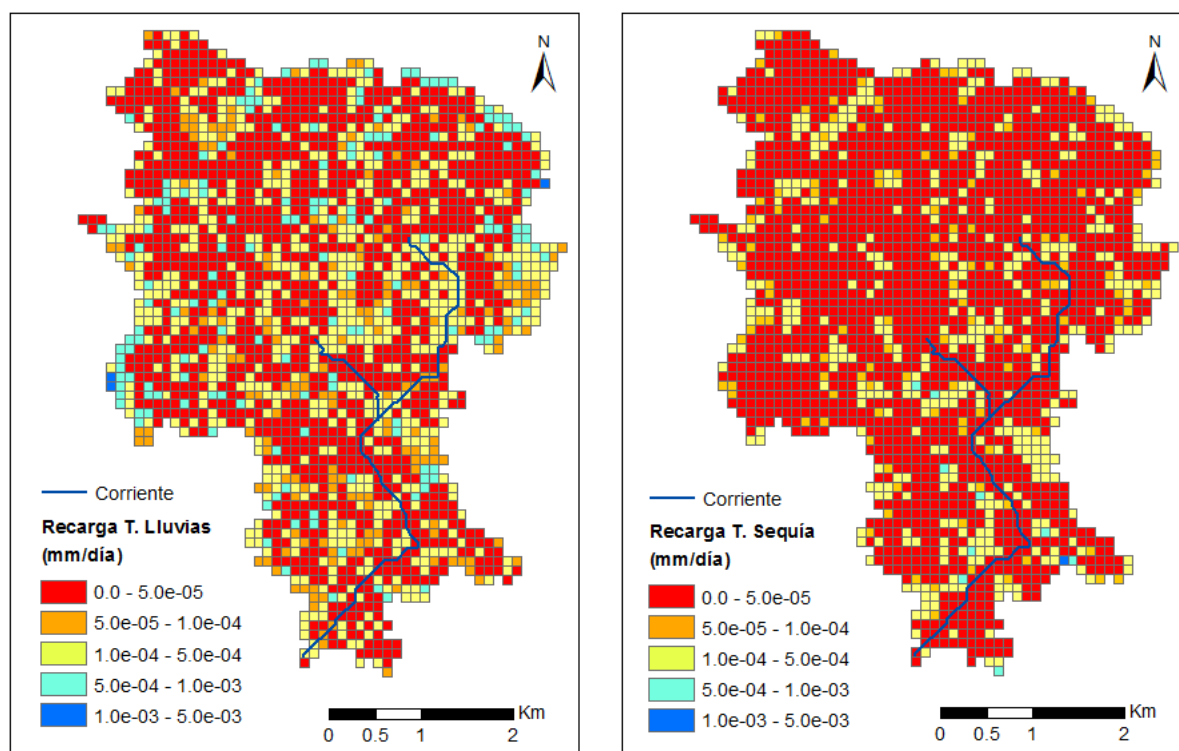


Figura 74. Recarga en el escenario 5 para la temporada de lluvia (izquierda) y temporada de sequía (derecha).

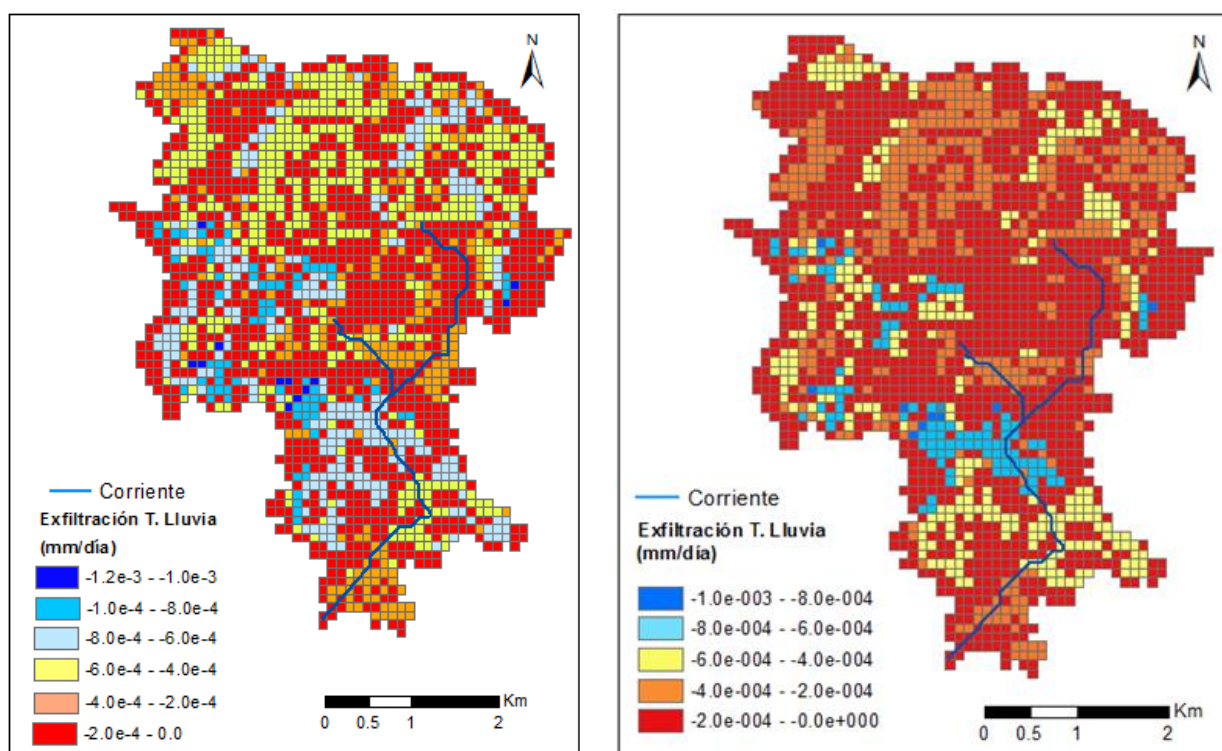


Figura 75. Exfiltración para el escenario 5. Año seco.

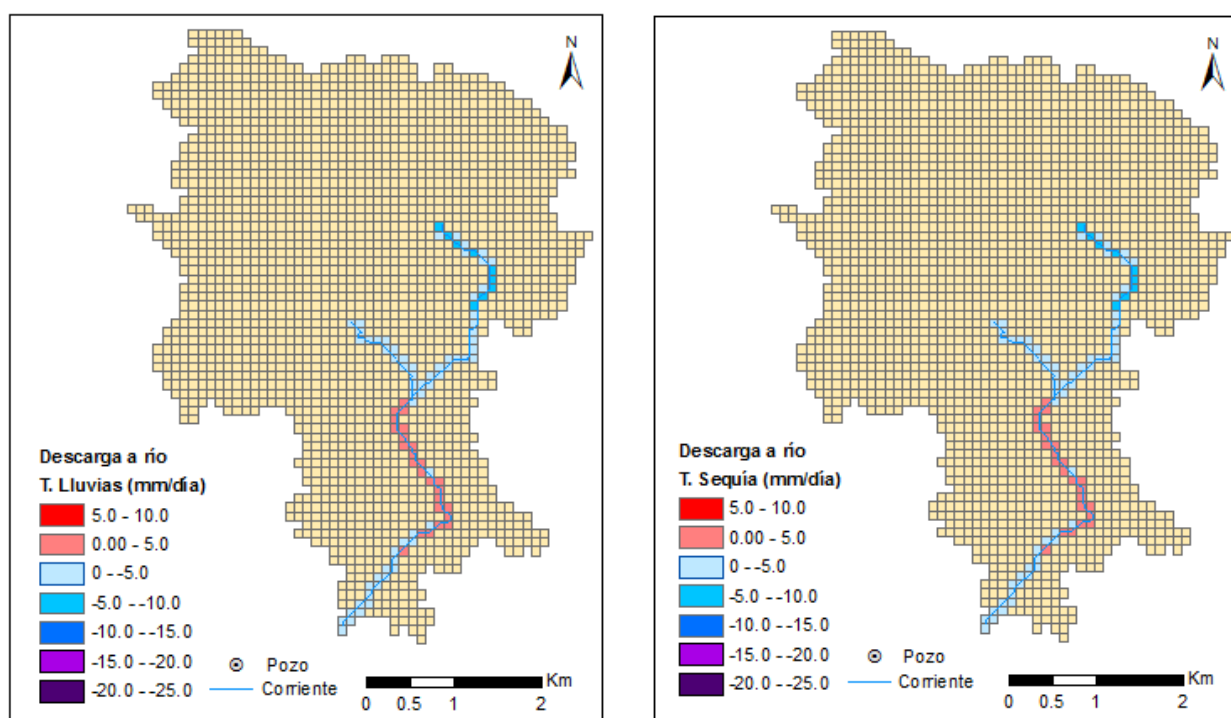


Figura 76. Interacción río-acuífero para el escenario 5. Año seco.

### 3.6 ESCENARIO 6: BOMBEO LEJOS DE LAS CORRIENTES PARA EL AÑO SECO

En este escenario se distribuyeron 7 pozos como en los escenarios 3 y 4, implementando el mismo caudal de extracción.

Flujo recarga natural ( $q_{\text{Recarga}}$ )	227mm/año = 13250.6m <sup>3</sup> /día
Caudal de bombeo (50% de $q_{\text{Recarga}}$ )	6625.3 m <sup>3</sup> /día
Caudal por pozo (7 pozos)	950 m <sup>3</sup> /día

El balance hídrico para este escenario se muestra en la Tabla 11 y Figura 77. Como sucede en los escenarios de lluvia intensa, la infiltración se reduce en un porcentaje muy bajo por la acción del bombeo. Se tiene un cambio considerable en el almacenamiento del acuífero.

Las Figuras 78 y 79 muestran la recarga y la exfiltración respectivamente. Se observa que efectivamente se induce la recarga al reducir la exfiltración. La descarga al río disminuye un 4%, especialmente por la reducción del flujo hipodérmico, siguiendo la tendencia de “río perdedor” en el tramo inferior de la corriente (ver Figura 80). En este escenario la escorrentía no es relevante.



**Tabla 11. Balance hídrico para el escenario 6. Año húmedo.**

Mes	Prec.	ET_Capilar	q_Río	q_Horton	q_Dunne	q_Hipo- dérmico	q_Acuifero- Río	q_Inf.	q_Perc.	q_Recarga	q_Exf.	q_Neta	ΔSup	ΔSgrav	ΔSns	ΔSac
Abr	217.40	83.16	28.31	24.27	0.00	4.04	0.00	193.13	7.10	3.06	4.80	-1.74	0.00	103.64	4.04	-11.21
May	297.51	113.96	114.68	65.77	0.00	47.20	1.72	231.74	63.74	27.87	5.54	22.34	0.00	12.38	35.87	11.14
Jun	111.30	106.33	33.66	20.72	0.00	11.32	1.62	90.58	13.06	16.63	5.91	10.71	0.00	-34.21	-3.56	-0.38
Jul	227.10	93.21	62.40	39.25	0.00	21.55	1.60	187.85	31.43	19.74	5.97	13.77	0.00	47.63	11.69	2.70
Ago	173.30	105.24	60.29	30.98	0.00	26.73	2.58	142.32	30.02	30.57	7.06	23.51	0.00	-12.61	-0.55	11.46
Sept	196.80	107.38	67.30	36.53	0.00	28.13	2.64	160.28	28.09	28.61	7.47	21.14	0.00	4.14	-0.52	9.02
Oct	118.00	151.53	52.37	20.97	0.07	28.04	3.29	97.03	24.52	34.85	8.85	26.00	0.00	-98.28	-10.34	13.24
Nov	57.80	79.74	5.11	1.90	0.00	1.15	2.06	55.90	0.00	13.63	7.85	5.78	0.00	-17.14	-13.63	-5.75
Dic	30.00	44.52	2.91	0.59	0.00	0.94	1.37	29.41	0.00	7.85	7.04	0.81	0.00	-9.01	-7.85	-10.03
Ene	0.00	20.61	1.44	0.00	0.00	0.66	0.78	0.00	0.00	4.90	6.13	-1.23	0.00	-15.14	-4.90	-11.48
Feb	11.30	12.03	0.83	0.09	0.00	0.43	0.31	11.21	0.00	3.03	4.93	-1.90	0.00	3.67	-3.03	-11.68
Mar	34.10	23.78	0.82	0.41	0.00	0.43	-0.01	33.69	0.00	2.50	4.94	-2.43	0.00	14.42	-2.50	-11.89
<b>Total</b>	<b>1474.63</b>	<b>941.49</b>	<b>430.13</b>	<b>241.48</b>	<b>0.07</b>	<b>170.60</b>	<b>17.97</b>	<b>1233.14</b>	<b>197.96</b>	<b>193.24</b>	<b>76.48</b>	<b>116.76</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.50</b>	<b>4.72</b>	<b>-14.85</b>
<b>%</b>	<b>100.00%</b>	<b>63.85%</b>	<b>29.17%</b>	<b>16.38%</b>	<b>0.00%</b>	<b>11.57%</b>	<b>1.22%</b>	<b>83.62%</b>	<b>13.42%</b>	<b>13.10%</b>	<b>5.19%</b>	<b>7.92%</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Diferencia con escenario 5</b>	<b>0.00%</b>	<b>-2.33%</b>	<b>-4.80%</b>	<b>-0.39%</b>	<b>0.00%</b>	<b>-4.22%</b>	<b>-0.19%</b>	<b>0.39%</b>	<b>2.92%</b>	<b>2.71%</b>	<b>-4.05%</b>	<b>7.67%</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

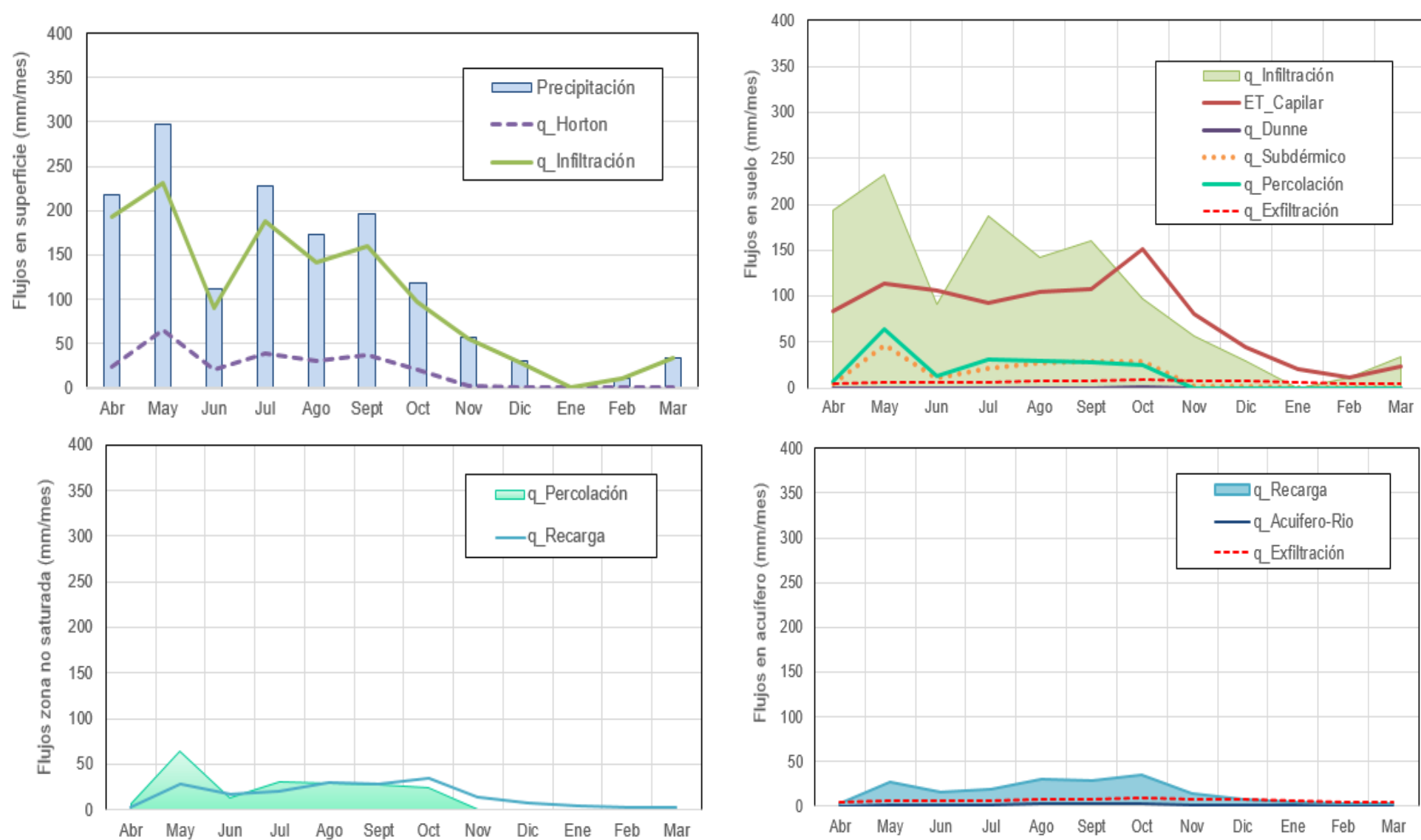


Figura 77. Flujos en cada reservorio para escenario 6. Año seco.

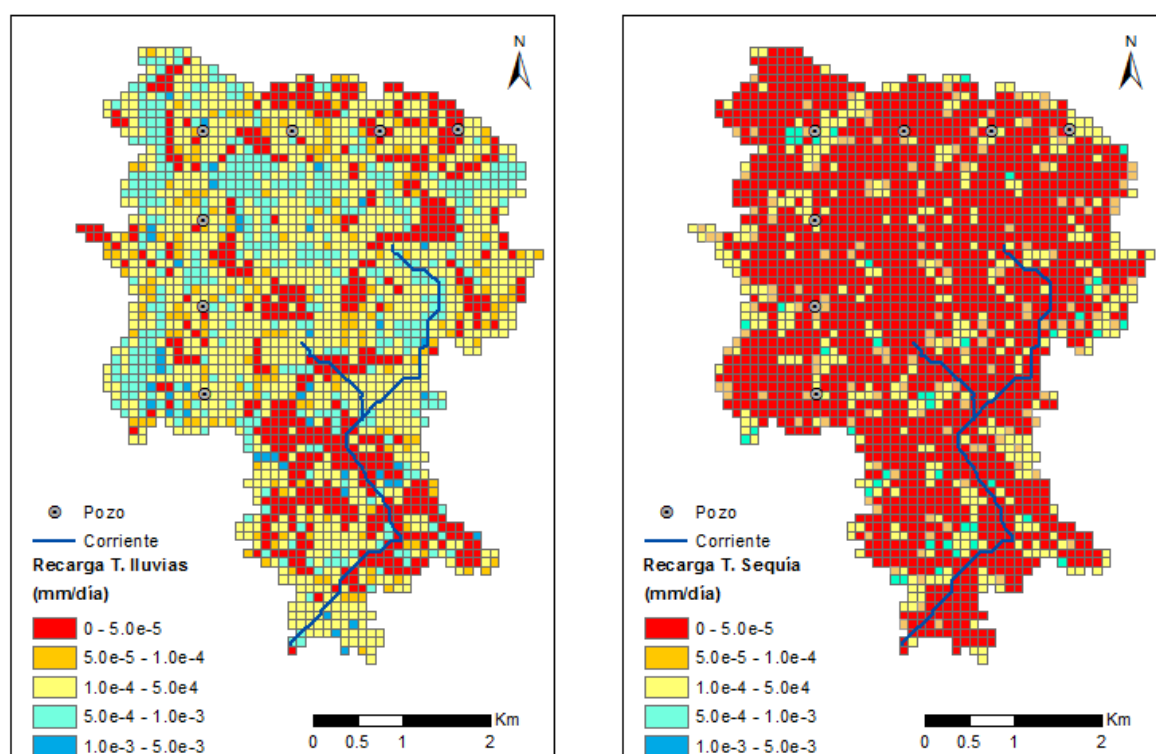


Figura 78. Recarga para el escenario 6. Año seco.

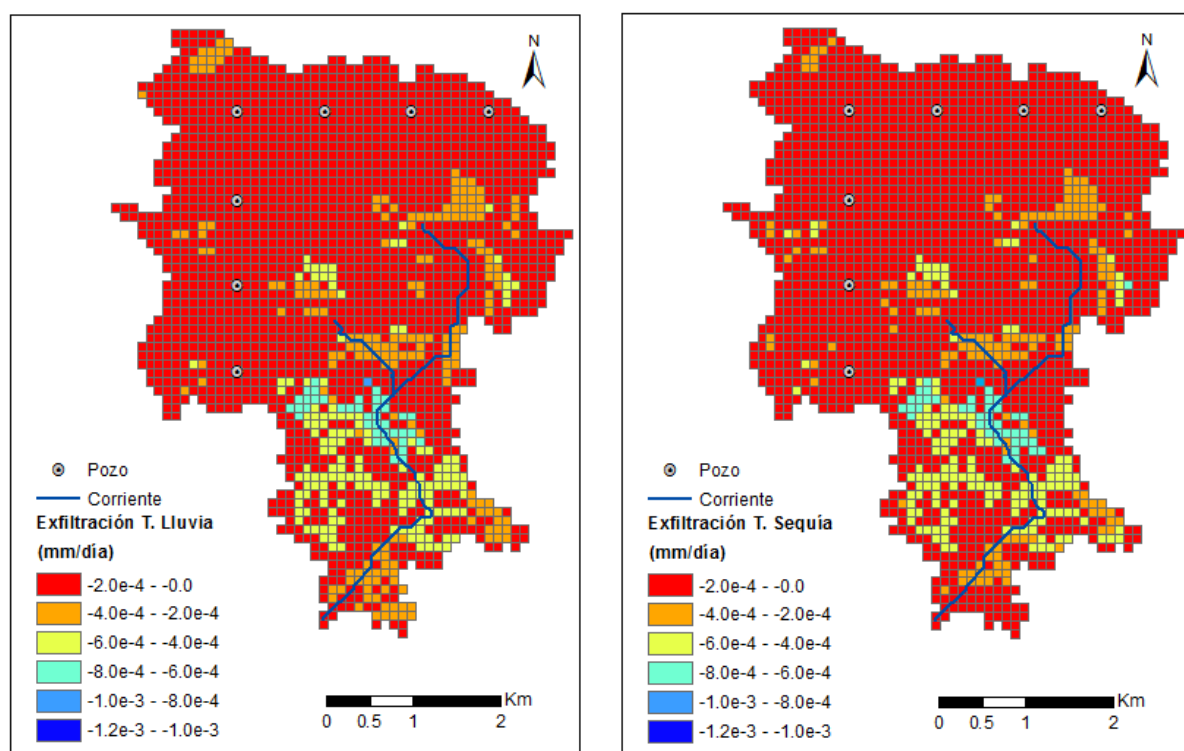


Figura 79. Exfiltración para el escenario 6. Año seco.

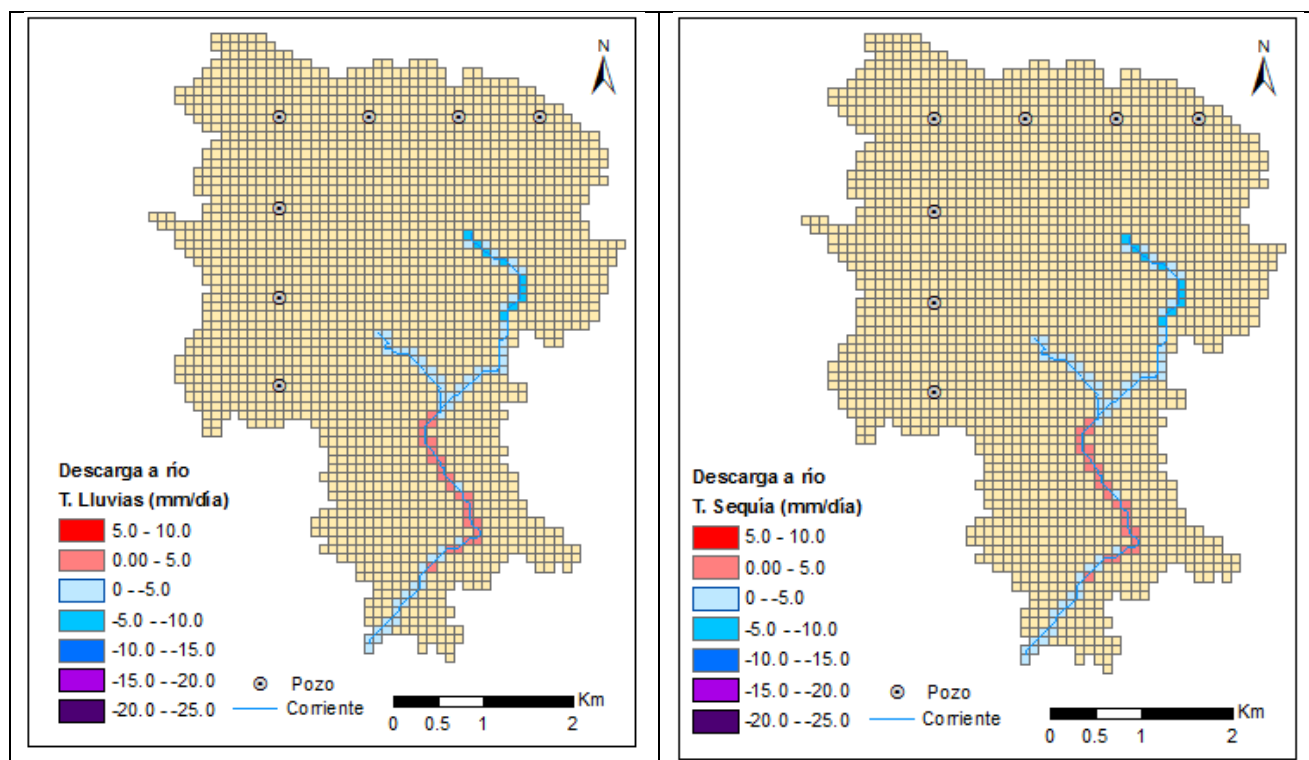


Figura 80. Interacción río-acuífero en el escenario 6. Año seco.

## 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 COMPARACIÓN DE BALANCES ENTRE ESCENARIOS 1 AL 4

La Tabla 12 resume el balance vertical de los escenarios 1, 2, 3 y 4<sup>1</sup>, evaluados en el periodo abril 2010 a marzo 2011. Para ser más claros en la comparación, se realizará el análisis de los flujos de entrada y salida por cada uno de los reservorios definidos: capilar, gravitacional, no saturado y acuífero.

#### 4.1.1 Reservorio superficial y capilar

En el capítulo anterior se había observado que tanto la infiltración como el flujo superficial variaban muy poco respecto a la condición natural establecida en el escenario 1. La Figura 81 evidencia que el bombeo sólo incrementa en 10mm aproximadamente la tasa de infiltración, que sólo representa 1.2% y se compensa con la reducción anual del flujo superficial.

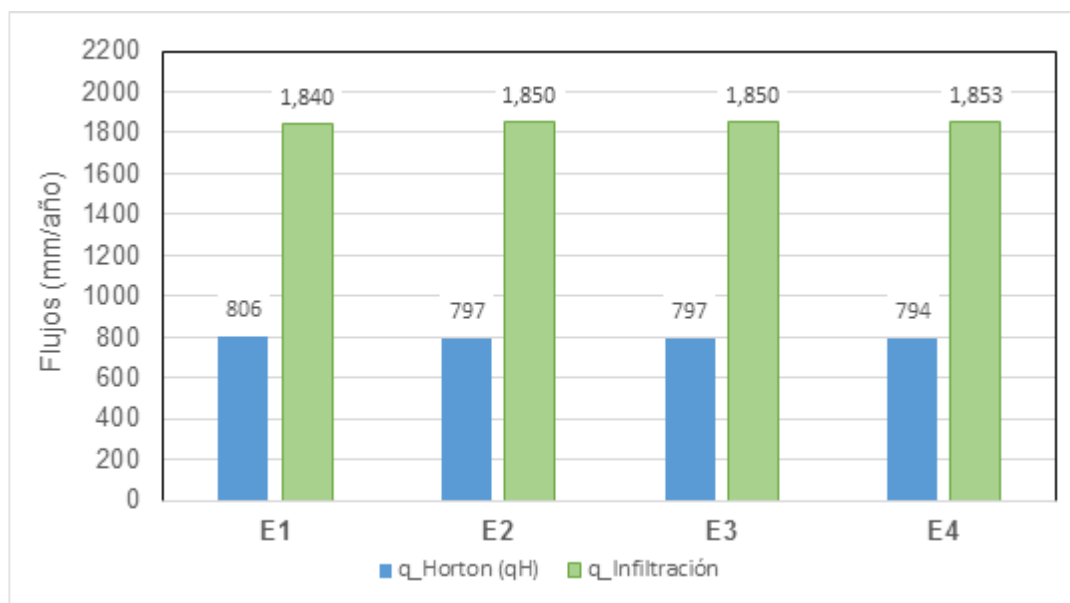


Figura 81. Comparación del flujo superficial de Horton y la infiltración para los cuatro escenarios<sup>1</sup>.

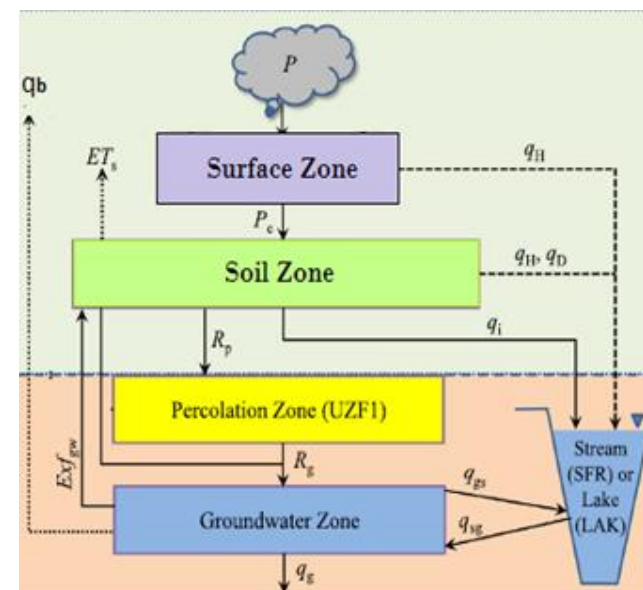
La explicación a esta diferencia se puede relacionar con la Figura 82 donde se compara la variación temporal del almacenamiento en el reservorio. En la temporada de lluvias alcanza su máxima capacidad y se mantiene constante hasta el comienzo del tiempo seco. Este comportamiento es igual en los 4 escenarios ya que el reservorio tiene un volumen limitado por la capacidad de campo del suelo limo-arcilloso, que incluso teniendo el efecto de bombeo el agua es retenida en los poros y no percola con facilidad al subsuelo.

Para la temporada de sequía se observa que los escenarios que involucran bombeo, llevan al reservorio a valores más próximos al punto de marchitez.

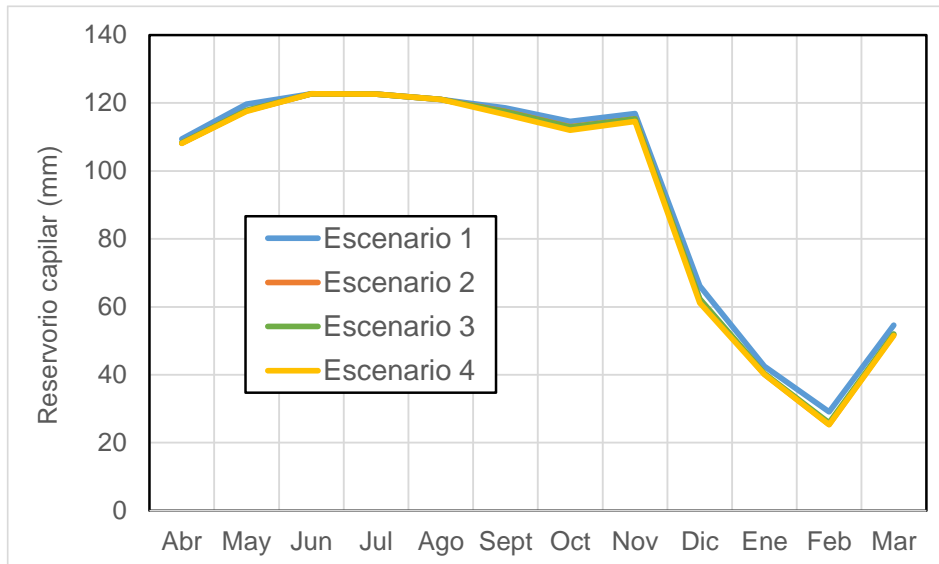
<sup>1</sup> Escenario 1 (E1): condición natural, escenario 2 (E2): pozos distribuidos cerca de los ríos, escenario 3 (E3): pozos en la periferia del área y escenario 4 (E4): pozos en la periferia con aumento de caudal bombeado

Tabla 12. Comparación de balances de los escenarios modelados. Las columnas amarillas representan la diferencia del escenario 1 respecto a los escenarios 2,3 y 4.

		E1	E2	E2-E1	E3	E3-E1	E4	E4-E1
<b>B. Superficie</b>	<b>Entra</b>							
	Precipitación (P)	2646.75	2646.75	0.00	2646.75	0.00	2646.75	0.00
	<b>Sale</b>							
	q_Horton (qH)	806.31	796.52	-9.79	796.84	-9.47	793.75	-12.56
	q_Infiltración	1840.44	1850.23	9.79	1849.90	9.47	1853.00	12.56
	<b><math>\Delta S</math></b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>B. Suelo</b>	<b>Entra</b>							
	q_Infiltración (Pe)	1840.44	1850.23	9.79	1849.90	9.47	1853.00	12.56
	q_Exfiltración (Exfgw)	184.23	122.46	-61.77	123.42	-60.81	107.46	-76.77
	<b>Sale</b>							
	ET_Capilar (Ets)	1311.09	1286.83	-24.26	1287.93	-23.16	1282.64	-28.45
	q_Dunne (qD)	3.21	3.28	0.07	3.28	0.07	3.30	0.09
	q_Hipodérmico (qi)	483.30	415.54	-67.76	404.97	-78.33	374.55	-108.75
	q_Percolación (Rp)	227.04	266.59	39.54	277.14	50.10	299.97	72.92
	<b><math>\Delta S</math></b>	0.03	0.46	0.43	0.00	-0.02	0.00	-0.03
<b>B. No Saturada</b>	<b>Entra</b>							
	q_Percolación (Rp)	227.04	266.59	39.54	277.14	50.10	299.97	72.92
	<b>Sale</b>							
	q_Recarga (Rg)	226.65	265.75	39.10	276.38	49.73	297.84	71.19
	<b><math>\Delta S</math></b>	0.39	0.84	0.45	0.77	0.37	2.13	1.74
<b>B. Acuífero</b>	<b>Entra</b>							
	q_Recarga (Rg)	226.65	265.75	39.10	276.38	49.73	297.84	71.19
	<b>Sale</b>							
	q_Exfiltración (Exfgw)	184.23	122.46	-61.77	123.42	-60.81	107.46	-76.77
	q_Acuífero-Río (qgs)	43.24	31.85	-11.39	41.10	-2.13	40.20	-3.04
	q_Bombeo (qb)	0.00	113.40	113.40	113.74	113.74	155.65	155.65
	<b><math>\Delta S</math></b>	-0.82	-1.96	-1.15	-1.89	-1.07	-5.47	-4.65





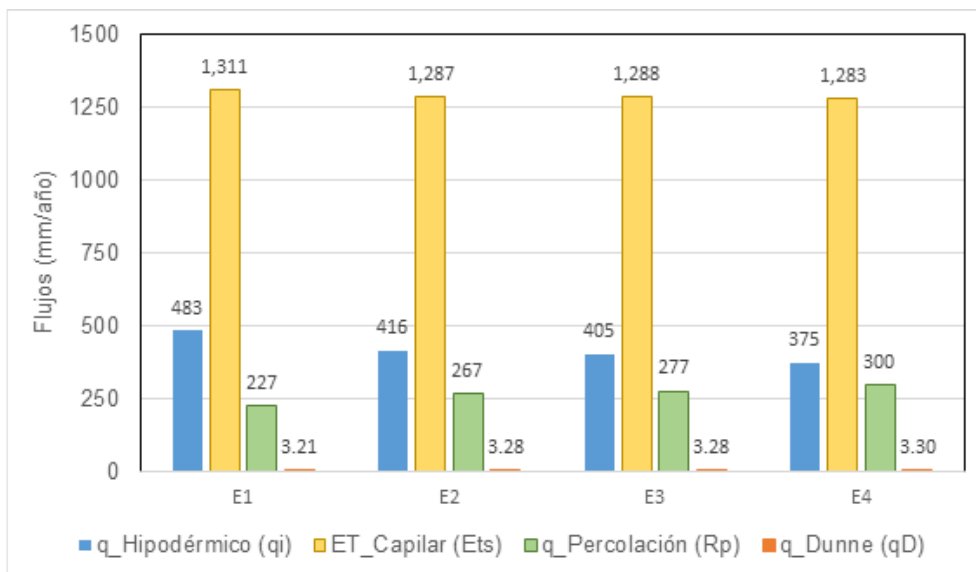


**Figura 82. Comparación de la variación mensual del almacenamiento capilar para los cuatro escenarios.**

#### 4.1.2 Reservorio gravitacional – zona suelo

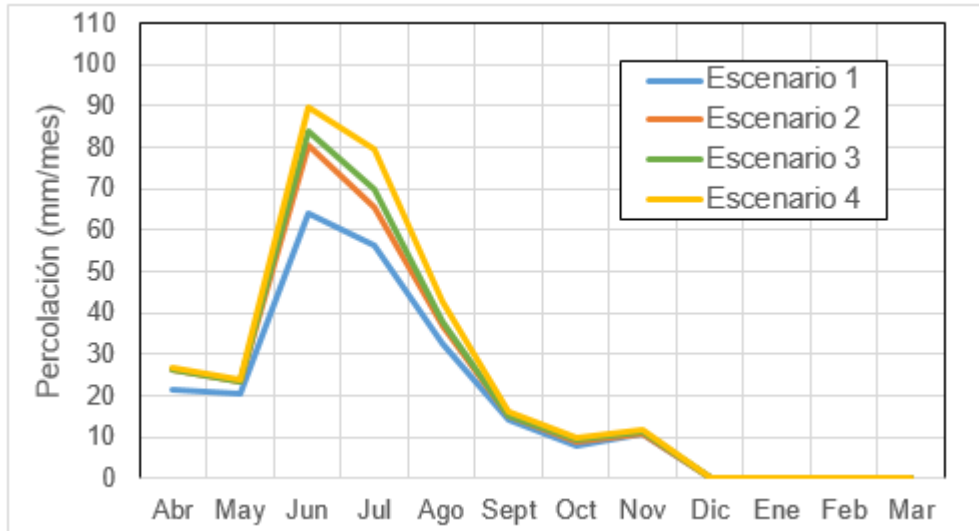
En este reservorio llega el agua infiltrada y se transforma mayoritariamente en evapotranspiración, la cual presenta una reducción del 1.85%, 1.77% y 2.17% para los escenarios 2, 3 y 4 respectivamente, tomando como referencia la condición natural. Este comportamiento se presenta conforme mayor agua percola menos queda en el almacenamiento.

El flujo hipodérmico se reduce significativamente a medida que se incrementa el bombeo, lo cual se debe a que prevalece el flujo en la dirección vertical que propicia la percolación del agua. La mayor diferencia está en el escenario 4 donde el bombeo alcanza los 156mm, lo que explica la reducción del flujo en un 70% respecto a la condición natural.



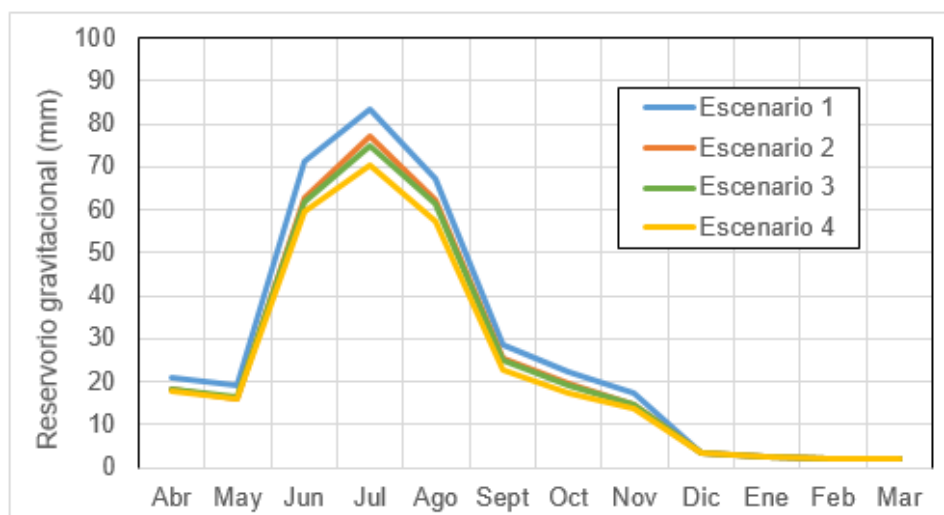
**Figura 83. Comparación de los flujos de salida del reservorio gravitacional para los cuatro escenarios.**

Uno de los flujos más importantes es el que corresponde a la percolación, ya que está directamente relacionado con la recarga al acuífero. Éste presenta el comportamiento inverso del flujo hipodérmico, aumenta con el caudal bombeado; para el escenario 4 dicho parámetro se incrementó un 32%. De acuerdo a la Figura 84 se observa que los incrementos se producen durante los meses de mayor precipitación, a partir de septiembre el flujo retorna paulatinamente a su comportamiento regular.



**Figura 84. Comparación de la variación mensual del flujo de percolación para los cuatro escenarios.**

Analizando la variación en el almacenamiento de este reservorio (Figura 85), es importante recalcar que para la temporada de lluvias en especial los meses de junio a agosto, se presentan mayores valores para la condición natural y decrecen conforme aumenta el caudal bombeado en los demás escenarios. Este comportamiento tiene su explicación en el tiempo que el agua transita de la zona superficial a la zona no saturada, que para el escenario 1 al no tener ninguna alteración por extracción, se concentra en esta región mientras los caudales naturales permiten su ingreso al acuífero. Para los demás escenarios, el bombeo impide que todo el volumen se concentre y permite que fluya recargando los reservorios subterráneos.



**Figura 85. Comparación de la variación mensual del almacenamiento gravitacional para los cuatro escenarios.**

Para la temporada de sequía el almacenamiento es prácticamente nulo ya que el agua del reservorio superficial está en su mínimo contenido y es utilizada por la vegetación del área, no se tiene percolación.

#### 4.1.3 Reservorio zona no saturada

La Figura 86 muestra que el 99% del flujo proveniente de la percolación llega a recargar al acuífero y tiene el mismo comportamiento en los 4 escenarios, la recarga se incrementa en 17.2% y 22% para los casos 2 y 3 respecto al modelo de las condiciones naturales, la mayor recarga corresponde al escenario 4 con un incremento del 32%, indicando que el bombeo aumenta la recarga.

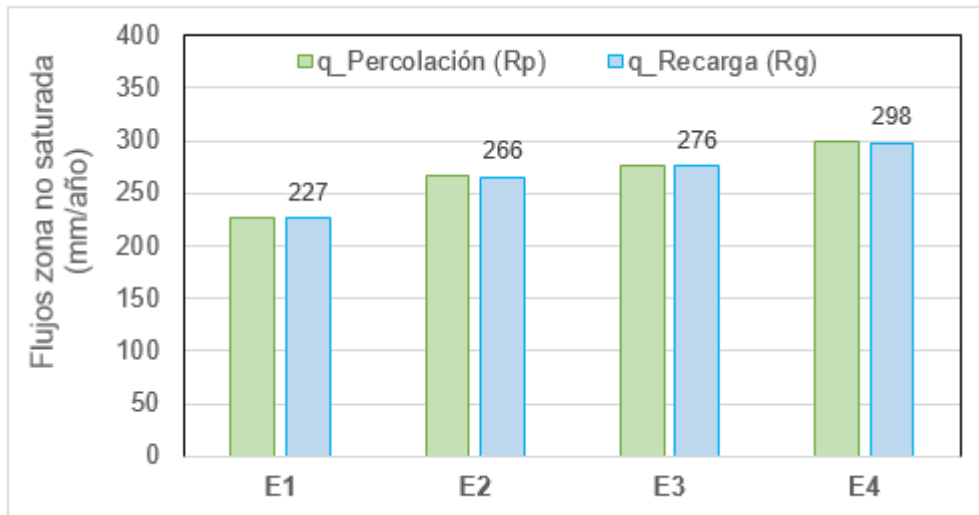


Figura 86. Comparación de los flujos anuales que se presentan en la zona no saturada para los cuatro escenarios.

De acuerdo al Figura 87, la recarga al igual que la percolación tiene sus máximas tasas en el periodo de junio a agosto. Para la temporada de sequía este parámetro es mínimo y coincide con el escenario 1 puesto que el flujo de percolación es nulo, la poca recarga se debe al volumen de agua que queda almacenado en la zona no saturada.

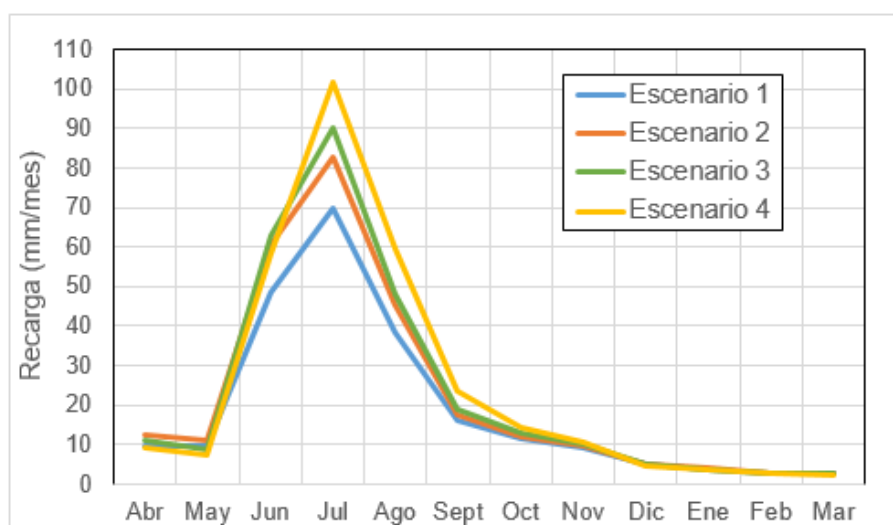
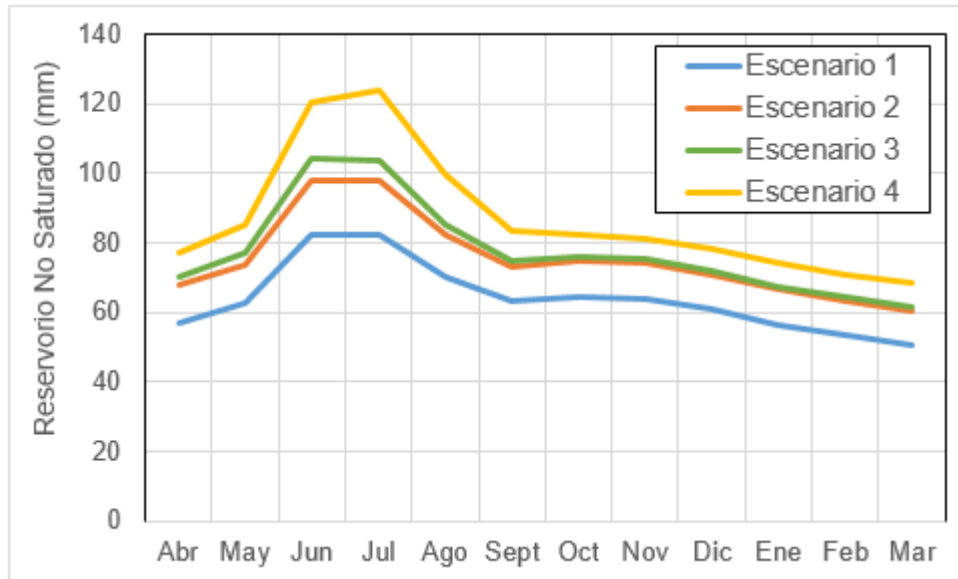


Figura 87. Comparación de la variación mensual de la recarga para los cuatro escenarios.

En cuanto al volumen almacenado en este reservorio, la Figura 88 evidencia pocas fluctuaciones respecto a lo observado en los reservorios anteriores. La zona no saturada tiene diferencias de solo 20mm entre la temporada de lluvia y la de sequía para la condición natural, que con el efecto del bombeo se incrementa aproximadamente el doble, indicando el descenso del nivel freático.



**Figura 88. Comparación de la variación mensual del almacenamiento de la zona no saturada para los cuatro escenarios.**

#### 4.1.4 Reservorio acuífero

Este reservorio contiene los flujos que más interesan en este proyecto, como son la recarga, la exfiltración y la interacción acuífero-río. La Figura 89 muestra que la exfiltración representa un 80% de la recarga para el escenario 1 y se reduce considerablemente con la acción del bombeo respecto al éste (33.5% para escenario 2, 33% para escenario 3 y 42% para escenario 4). Es decir, el descenso de niveles implica que menos agua es rechazada a los reservorios superiores.

Su comportamiento se puede apreciar en la Figura 90, donde es evidente el cambio de la condición natural a los escenarios con bombeo. En un principio se pensaba que este volumen desplazado contribuía a la inundación de la superficie del terreno, sin embargo en el análisis de los reservorios anteriores, se evidenció que este flujo retornado puede quedar almacenado en el reservorio gravimétrico o transformarse en flujo en el interior del suelo, ya que es en estos parámetros donde se ve una relación directa cuando decrece.

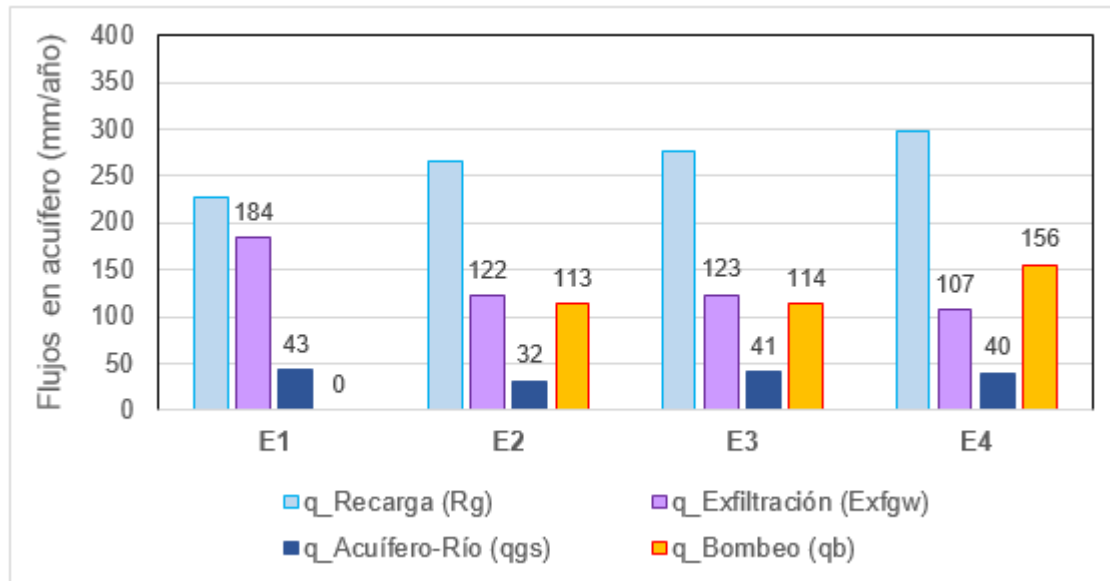


Figura 89. Comparación de los flujos anuales que se presentan en el acuífero para los cuatro escenarios.

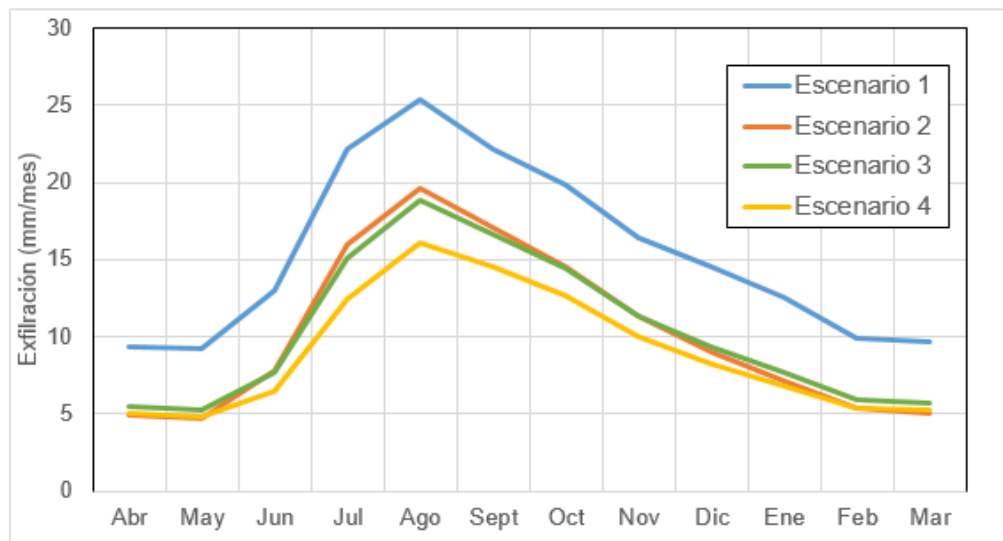
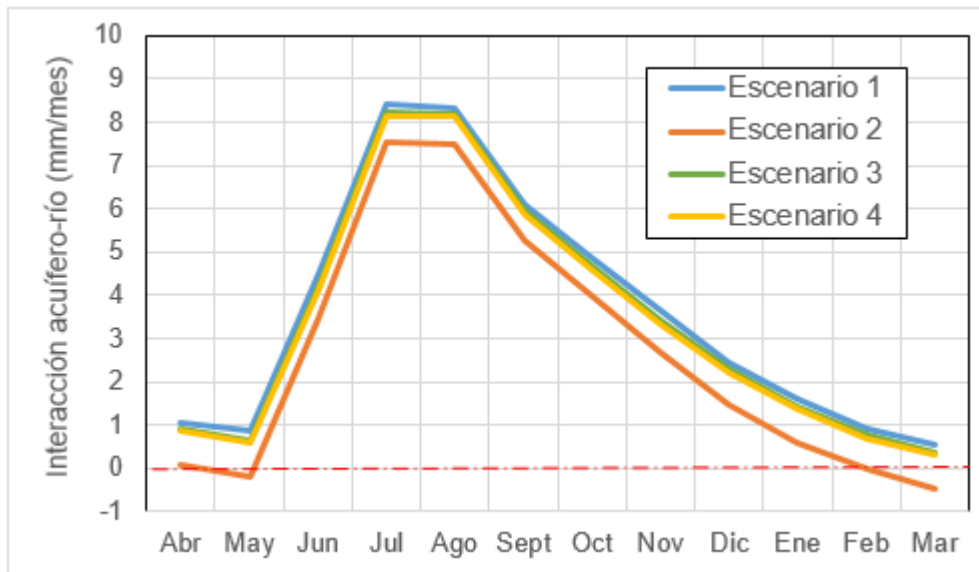


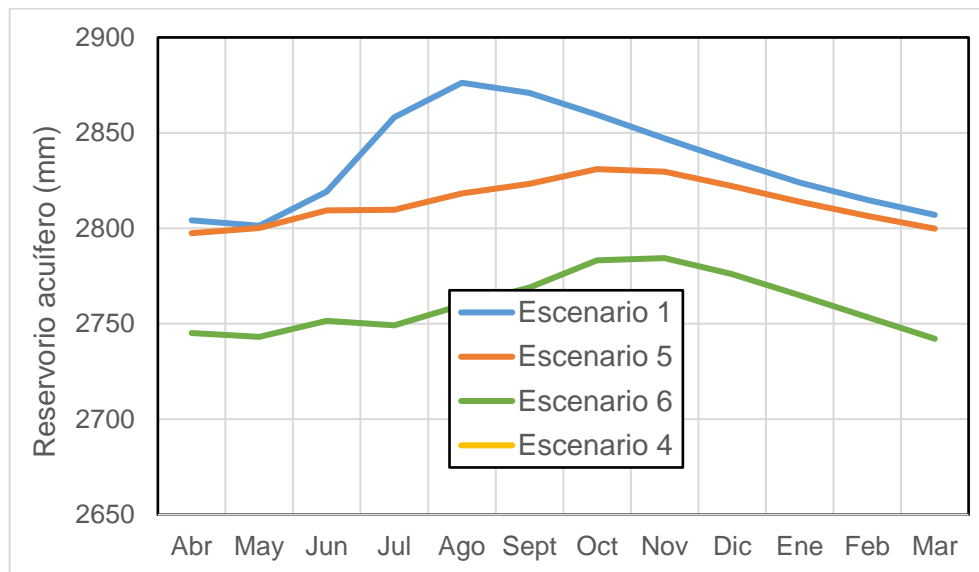
Figura 90. Comparación de la variación mensual de la exfiltración para los cuatro escenarios.

La interacción acuífero-río es fundamental para la conservación del ecosistema, sin embargo en este caso el flujo es poco, sólo representa 20% de la recarga que llega al acuífero para el escenario 1 y disminuye en las demás condiciones por el efecto del bombeo. La Figura 91 muestra la variación temporal de este flujo, el escenario 2 representa la mayor diferencia ya que tiene pozos bombeando cerca de las corrientes y como se apreció en el capítulo 3, se presentan periodos (mayo, febrero y marzo) donde el río comienza a perder agua hacia el acuífero y tendría la tendencia a secarse, lo cual no puede permitirse y por ende este modelo queda descartado.



**Figura 91. Comparación de la variación mensual de la interacción acuífero-río para los cuatro escenarios.**

La Figura 92 muestra la variación temporal del almacenamiento en el acuífero. Los 4 escenarios presentan el mismo comportamiento y se observa cómo se reduce el nivel a medida que se aumenta el bombeo, siendo más apreciable en el escenario 4 donde se disminuye en 90mm respecto a la condición natural.



**Figura 92. Comparación del almacenamiento de la zona saturada para los cuatro escenarios.**

En la Figura 93 se observa la variación temporal del flujo de descarga al río, el cual es la sumatoria de los flujos de escorrentía, hipodérmico, dunniiano y la interacción río-acuífero. En los cuatro escenarios prevalece el flujo de escorrentía de Horton como se mencionó anteriormente, la mayor diferencia se tiene en el escenario 2 durante la época de sequía, donde los pozos cerca de los ríos reducen en un 70% la interacción río-acuífero.



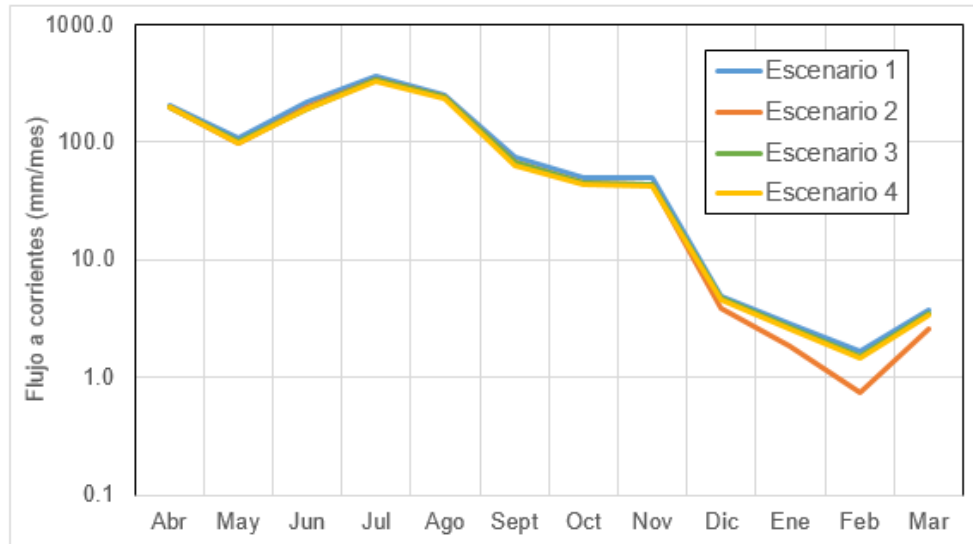


Figura 93. Comparación de los flujos de salida al río para los cuatro escenarios.

#### 4.1.5 Elección del escenario más apropiado

Tomando en cuenta las comparaciones realizadas de los parámetros involucrados en el balance por cada escenario, se pueden tener las siguientes apreciaciones:

- La infiltración no es proporcional al bombeo y que depende de las características propias del suelo, que para este caso al considerarse una humedad inicial alta y una capacidad de campo baja, no era posible permitir el flujo del agua superficial hacia los reservorios del subsuelo. Por esta razón los 4 escenarios modelados presentan un comportamiento análogo con unas diferencias mínimas entre sí.
- El bombeo afecta directamente los flujos subterráneos de salida al río, como son el flujo hipodérmico y la interacción acuífero-río. Éstos se reducen y pueden llegar a desestabilizar el régimen natural, cuando se bombea cerca del río, caso que se presenta en el escenario 2.
- La recarga viene dada el agua almacenada en el reservorio gravitacional, que con el efecto del bombeo aumenta la tasa de percolación reduciendo este reservorio.
- Los flujos de exfiltración se reducen, sin embargo el acuífero aumenta sus pérdidas conforme es mayor el bombeo. Los niveles de almacenamiento se reducen siguiendo el mismo patrón, que en el caso del escenario 4 pueden presentar descensos de 3m respecto al modelo de condiciones naturales.

De acuerdo al análisis realizado el escenario 3, que tiene pozos lejos de las corrientes y un caudal de bombeo igual al 50% de la recarga, podría considerarse como la mejor alternativa para implementar la extracción del agua subterránea sin modificar excesivamente las condiciones naturales de la zona de estudio.

## 4.2 COMPARACIÓN DE BALANCES ENTRE ESCENARIOS 1, 5 Y 6

Los escenarios 5 y 6 modelan el área de estudio durante el año 2014-2015 que se caracterizó por bajas precipitaciones y altas temperaturas, es decir un año de sequía intensa. El escenario 5 representa la condición natural durante esta temporada y el escenario 6 desarrolla la condición con bombeo igual al 50% de la recarga hallada en el escenario 1. Estos escenarios fueron comparados entre sí y con el escenario 1, donde se modela la condición natural bajo lluvias intensas. La Tabla 13 muestra el resumen del balance hidrológico para los escenarios 5 y 6.

En la Tabla 12 se encuentra la comparación de los flujos de entrada y salida de cada reservorio. Debido a que la precipitación se redujo alrededor de un 50%, los escenarios 5 y 6 infiltran el 80% de dicha precipitación, presentando una escasa escorrentía. De igual forma se disminuyen los flujos de suelo, especialmente el flujo hipodérmico con el cual se puede prever que el caudal de salida al río será muy bajo respecto a la condición del escenario 1. Para los reservorios del subsuelo, la percolación se reduce un 30% entre las condiciones naturales de lluvias intensas (escenario 1) y sequía (escenario 5), la recarga tiene un comportamiento análogo. Implementando el bombeo en el escenario 6, se logra aumentar la entrada de agua al acuífero, sin embargo no llega a alcanzar los niveles del escenario 1. En el acuífero, la exfiltración se reduce considerablemente por la acción del bombeo en el escenario 6, es importante resaltar que la interacción río-acuífero se ve claramente afectada durante esta temporada de sequía, viéndose reducida a la mitad en el escenario 5 respecto al escenario 1 y aún más en el escenario 6 por el bombeo.

La Figura 94 describe la descarga de flujo al río, siendo menor en el año seco (escenario 5 y 6) por la reducción de la escorrentía y flujos del subsuelo.

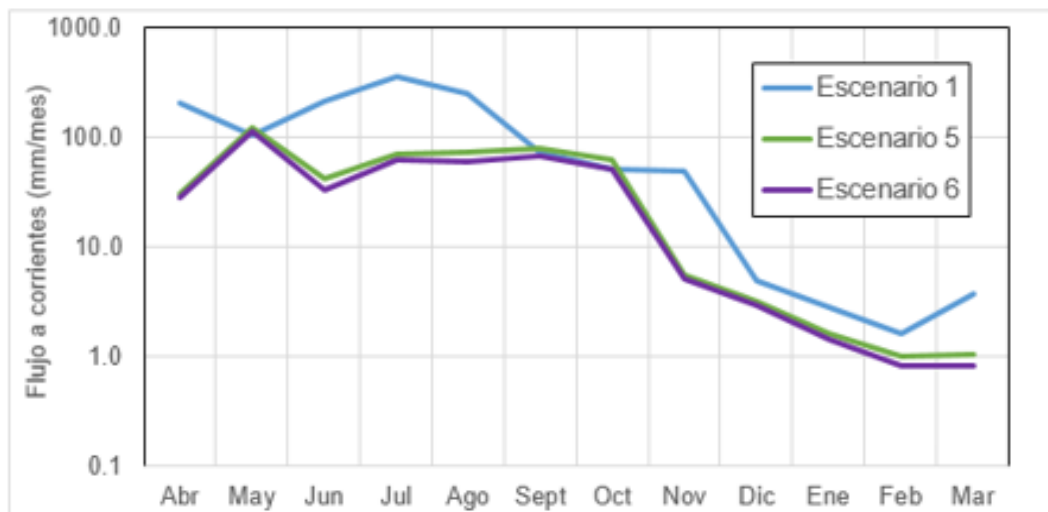
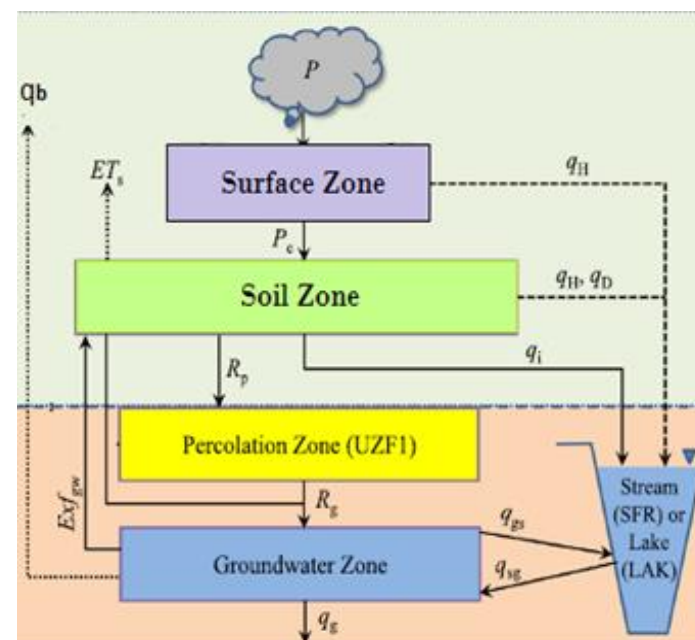


Figura 94. Flujo de salida al río para los escenarios 1, 5 y 6.

La variación de los almacenamientos se presenta en la Figura 96. En el reservorio capilar se tiene el almacenamiento completo desde mayo a septiembre, y se observa que desciende antes que el escenario 1, evidenciando que durante los meses de sequía se alcanzan niveles por debajo del punto de marchitez. El reservorio gravitacional disminuye en los escenarios 5 y 6 debido a la reducción del flujo hipodérmico. Comparando las condiciones naturales de los escenarios 1 y 5, para los reservorios no saturado y acuífero, tienen comportamientos similares que dependen del agua que ingresa al acuífero, igualmente se aprecia el efecto del bombeo del escenario 6.

Tabla 13. Comparación de balances de los escenarios 5 y 6. La columna amarilla representa la diferencia del escenario 5 respecto al 6.

		E5	E6	E5-E6
<b>B. Superficie</b>	<b>Entra</b>			
	Precipitación (P)	1474.63	1474.63	0.00
	<b>Sale</b>			
	q_Horton (qH)	247.21	241.48	5.73
	q_Infiltración	1227.42	1233.14	-5.73
	<b><math>\Delta S</math></b>	0.00	0.00	0.00
<b>B. Suelo</b>	<b>Entra</b>			
	q_Infiltración (Pe)	1227.42	1233.14	-5.73
	q_Exfiltración (Exfgw)	136.18	76.48	59.70
	<b>Sale</b>			
	ET_Capilar (Ets)	975.80	941.49	34.31
	q_Dunne (qD)	0.06	0.07	-0.01
	q_Hipodérmico (qi)	232.78	170.60	62.18
	<b><math>\Delta S</math></b>	0.04	-0.50	0.53
<b>B. No Saturada</b>	<b>Entra</b>			
	q_Percolación (Rp)	154.92	197.96	-43.04
	<b>Sale</b>			
	q_Recarga (Rg)	153.34	193.24	-39.90
	<b><math>\Delta S</math></b>	1.58	4.72	-3.14
<b>B. Acuífero</b>	<b>Entra</b>			
	q_Recarga (Rg)	153.34	193.24	-39.90
	<b>Sale</b>			
	q_Exfiltración (Exfgw)	136.18	76.48	59.70
	q_Acuífero-Río (qgs)	20.80	17.97	2.83
	q_Bombeo (qb)	0.00	113.74	-
	<b><math>\Delta S</math></b>	-3.64	-14.95	-11.31



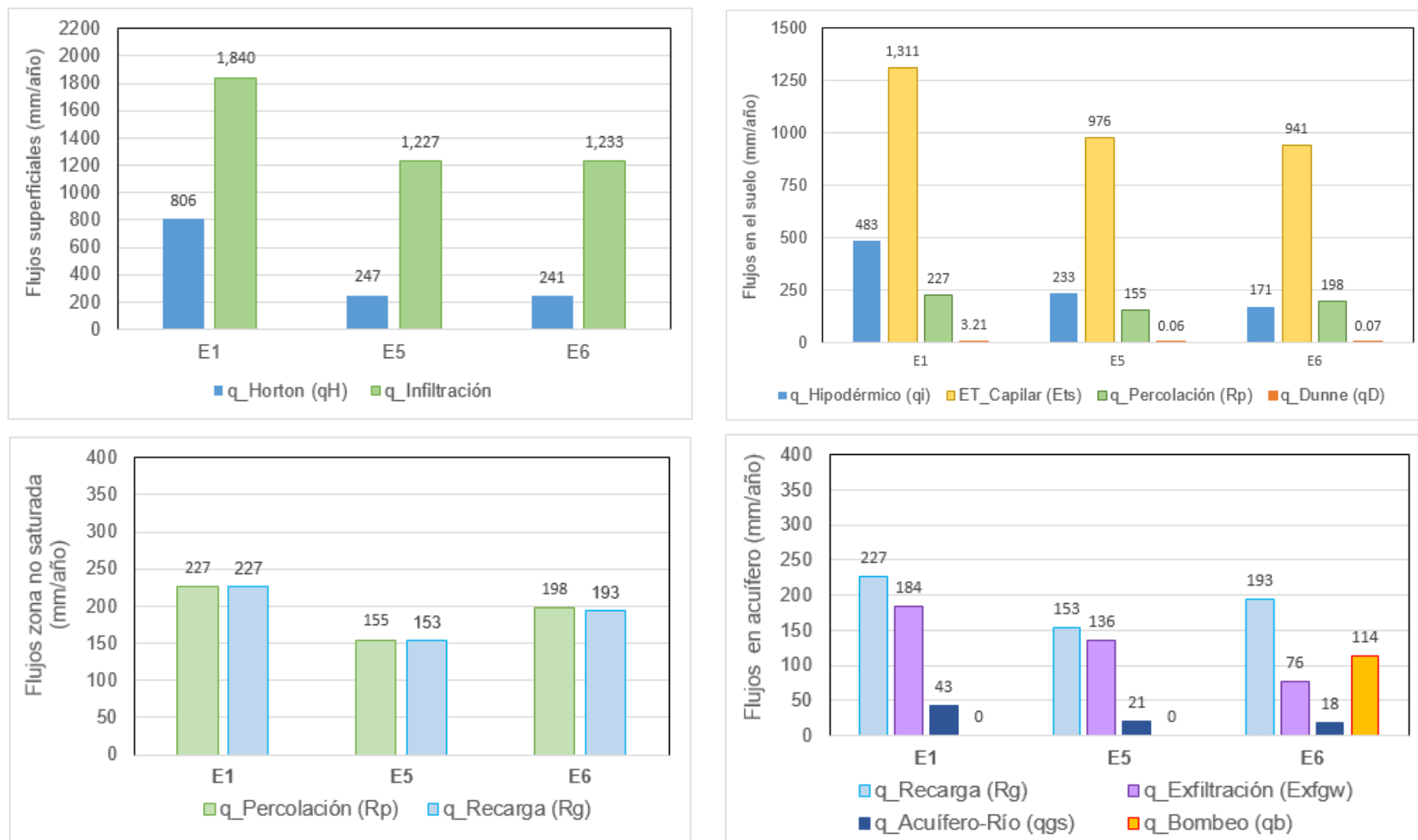


Figura 95. Comparación de flujos en los diferentes reservorios para los escenarios 1, 5 y 6.

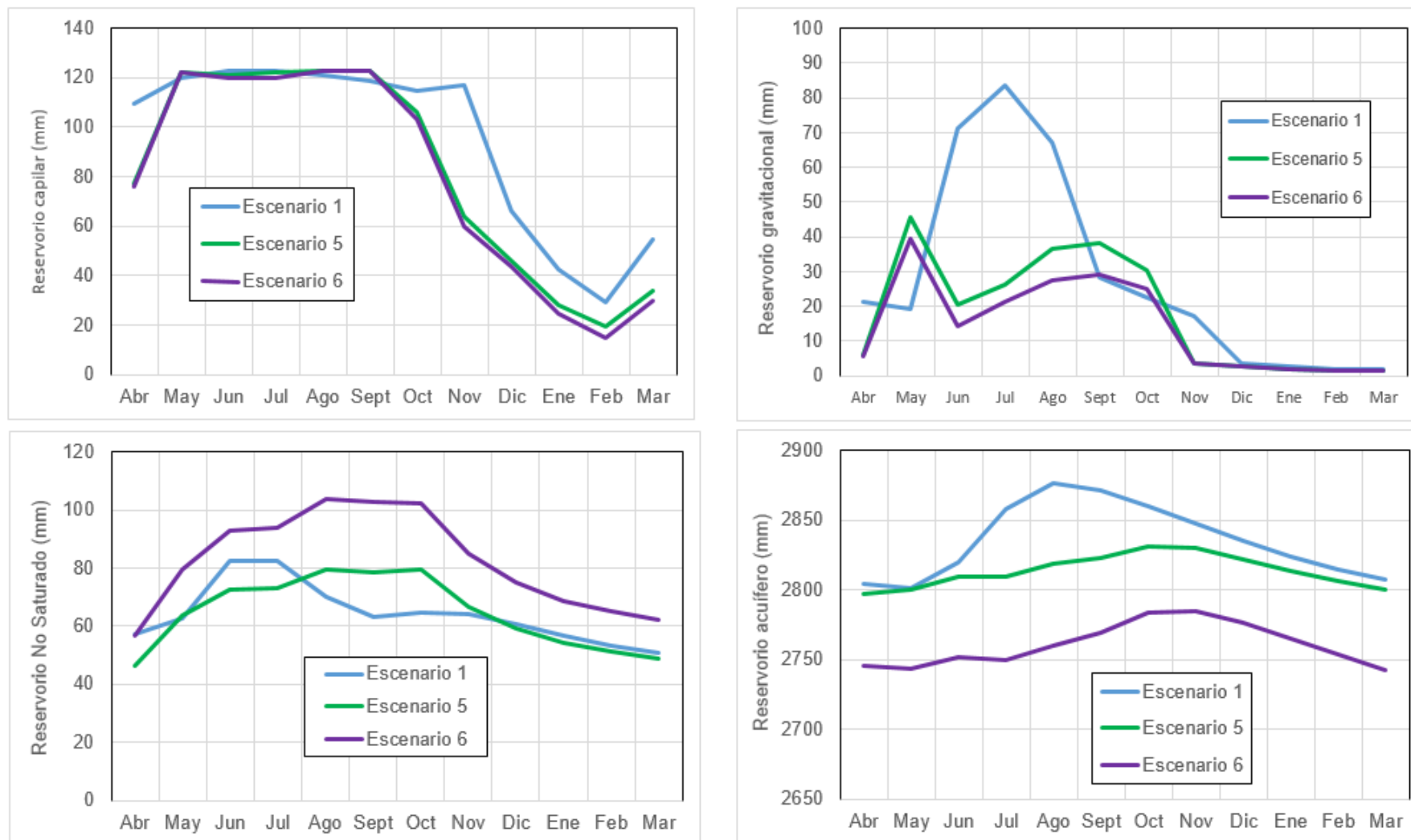


Figura 96. Comparación de almacenamientos en los diferentes reservorios para los escenarios 1, 5 y 6.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al estudio realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Las llanuras tienen un comportamiento hidrológico muy diferente a otros terrenos. Su bajo relieve hace que los flujos verticales tengan mayor importancia que los horizontales. El conocimiento de la hidrogeología de llanuras es incipiente.
- Los Llanos Orientales presentan un clima tropical marcado por dos estaciones al año, lluvias y sequía. La temporada de lluvias comprende los meses de abril hasta noviembre y se caracteriza por altas y constantes precipitaciones. Estas conducen a la generación de zonas anegadas por el bajo relieve que impide el drenaje del agua de escorrentía y constituye una problemática para la región. Irónicamente, pese a la abundancia de lluvias, se tienen problemas de suministro en años secos.
- Para analizar la hidrología de estas zonas, se ha realizado un modelo numérico. Sobre el mismo, se han simulado varios escenarios (años secos y húmedos, bombeo o no) con el objetivo de analizar el impacto del bombeo sobre la escorrentía, la recarga y, especialmente, el caudal de base de los ríos.
- El modelo se ha realizado con el software GSFLOW, que cumplió con el objetivo de analizar la interacción diaria entre los flujos superficiales y subterráneos y permitió conocer el comportamiento hidrogeológico del área de estudio y determinar los valores de recarga para los diferentes escenarios modelados.
- Los resultados de los diferentes escenarios muestran que el bombeo afecta directamente el flujo del acuífero hacia el río y que este impacto depende de la distancia entre pozo y río. Para evitar afectaciones en los caudales ecológicos, especialmente durante la temporada de sequía, los pozos deben ubicarse de tal forma que su radio de influencia no intercepte una masa de agua superficial.
- Se había conjeturado que la infiltración ayudaría a reducir los niveles de inundaciones. Sin embargo, no sufre cambios relevantes entre la condición natural y los escenarios con bombeo, reduciéndose sólo en un 1%. Es decir, apenas se ve afectada por el aumento del caudal extraído. Esto refleja la baja permeabilidad adoptada para el estrato de suelo limo-arcilloso, que condiciona la recarga inducida al acuífero. Esta técnica sería viable para ambientes con estratos más permeables.
- El aumento de la recarga que se observó en los escenarios de bombeo, no se genera a partir del aumento en la tasa de infiltración como era la hipótesis planteada en este trabajo. Esta recarga se induce del almacenamiento del reservorio gravitacional y se aprecia con la disminución del flujo hipodérmico.
- Evaluando las condiciones de bombeo para abastecimiento, se consideró que bombear lejos de los ríos (escenarios 3 y 6) puede ser la mejor opción para explotar el acuífero. La distancia de los pozos a las corrientes garantiza que se vean poco afectadas por los bombeos.



Dentro de las recomendaciones que podrían derivarse de la presente investigación se presentan:

- Este trabajo representa una aproximación del comportamiento del ciclo hidrológico en los Llanos Orientales, sin embargo es necesario la ejecución de estudios a nivel regional que determinen con precisión las características hidráulicas de los acuíferos y de esta forma ajustar los modelos.
- Se debe plantear ante las autoridades ambientales la ejecución de una prueba piloto siguiendo el esquema y ver el comportamiento real.
- La modelación debería realizarse para un espacio de tiempo mayor a un año de tal forma se observen los diferentes cambios en el comportamiento hidrogeológico ante fenómenos como el niño y la niña que afectan periódicamente al país.
- Realizar análisis de sensibilidad en los parámetros de la zona edáfico como la capacidad de campo y el contenido de humedad inicial, los cuales inducen la infiltración de la precipitación en el suelo.
- Implementar softwares acoplados de tipo comercial, tales como Hidrogeósfera, para realizar la modelación del ciclo hidrogeológico y comparar con los resultados arrojados por el GSFLOW.

## 6 REFERENCIAS

- Álvarez, M., Hernández, M., Trovatto, M., González, N; 2013. *Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del Sur de Península Valdés*. Agua subterránea recurso estratégico - Tomo I, pp. 13-22, ISBN: 987-1985-04-5, Buenos Aires, Argentina.
- Banco Mundial Colombia, 2012. *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá, Colombia.
- Carrera Ramírez, J., 1997. *Observación y medida de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas*. En: Custodio, E., Llamas, M.R., y Samper, J. (Ed.) *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*, , 229-245.
- Custodio, E., 1997. Recarga de acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. AIH-GE, p. 19-39. Las Palmas de Gran Canaria.
- Estrada, O., Vélez, J., Vélez, M., Restrepo, C.; 2010. *Modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas para la gestión conjunta del recurso hídrico*. XXIV congreso latinoamericano de hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Fertonani, M. y Prendes, H.; 1983. *Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos*. Actas del Coloquio de Olavarría de Hidrología de las grandes llanuras. Vol. I, pp. 118-156. Buenos Aires, Argentina.
- Hassan T., Lubczynski, M., Niswonger, R.G., Su, Z.; 2014. *Surface-groundwater interactions in hard rocks in Sardon Catchment of western Spain: An integrated modeling approach*. Journal of Hydrology 517 (2014) 390–410.
- IDEAM, 2014. *Estudio Nacional del Agua*, Sistema de Acuíferos. Bogotá, Colombia.
- Jensen, M.E., Rob, D.C.N., Franzoy, C.E., 1969. Scheduling irrigations using climatecrop-soil data. In: National Conference on Water Resources Engineering of the American Society of Civil Engineers, New Orleans, La, pp. 20.
- KRUSE, E. y ZIMMERMANN, E.D. 2002. *Hidrogeología de Grandes Llanuras. particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina)*. Actas del Congreso Agua Subterránea y Desarrollo Humano, Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. (Editores), Volume (CD), pp. 2025-2038.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., Barlow, P.M., 2008. GSFLOW-Coupled Ground-water and Surface-water FLOW model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005). Techniques and Methods 6-D1. U.S. Geological Survey.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; 2014. *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*. ISBN: 978-958-8491-83-7. Bogotá, Colombia.
- Murillo Díaz, J. et al.; 2000. *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la Provincia de Alicante*. Libro electrónico: <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro36/lib36.htm>.

- Niswonger, R.G., Prudic, D.E., 2004. Modeling Variably Saturated Flow Using Kinematic Waves in MODFLOW. In: Hogan, J.F., Phillips, F.M., Scanlon, B.R. (Eds.), Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States. Water Science and Application. American Geophysical Union, pp. 101–112.
- Niswonger, R.G., Prudic, D.E., 2005. Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to include unsaturated flow beneath streams—A modification to SFR1. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A13.
- Niswonger, R.G., Prudic, D.E., Regan, R.S., 2006. Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZF1) Package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005. U.S. Geological Techniques and Methods Book 6, Chapter A19, pp. 62.
- Panday, S., Huyakorn, P.S., 2004. A fully coupled physically-based spatially distributed model for evaluating surface/subsurface flow. Adv. Water Resour. 27 (4), 361–382.
- PNUD, 2012. *Informe Nacional de Desarrollo Humano Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1 (5), 318–333.
- Sapirza G., Jodar J., Carrera J.; 2010. *Coupled hydrological models, with emphasis on the estimation of groundwater recharge*. XVIII International Conference on Computational Methods in Water Resources. Barcelona, España.
- Schosinsky, G., 2006. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*.- Rev. Geol. América Central, 34-35: 13-30.
- Scioli, C. y Villanueva, A.; 2011. *Modelación hidrológica de grilla en zonas de llanura: Movimiento multidireccional del agua*. Aqua-LAC - Vol. 3 - Nº.1. Buenos Aires, Argentina.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2014. Estudios de cartografía geológica escala 1.100.000 Bloque 8 en el Vichada Plancha 233-Orocué. Medellín, Colombia.
- Sophocleus, M. *Interaction between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal. Vol. 10, No. 1, 2002, pp. 52-67.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2006. Hydrogeosphere. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo, Canada.
- Vargas Martínez, N.O. 2006. *Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia*. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 47-61. Bogotá, Colombia.
- Vasquez-Suñé, E., Capino B., Abarca E., and Carrera J. ; 2007. *Estimation of Recharge from Floods in Disconnected Stream-Aquifer Systems*. Ground water 45, No. 5: pp. 579-589.
- Veloza Franco, J.A., Morales Arias, C.J., 2009, *Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico en el municipio de Maní departamento de Casanare*. Boletín de Geología [en línea]. Bucaramanga, Colombia.
- Weill, S., Mazzia, A., Putti, M., Paniconi, C., 2011. Coupling water flow and solute transport into a physically-based surface–subsurface hydrological model. Adv. Water Resour. 34 (1), 128–136.